

Braunschweigische  
Wissenschaftliche Gesellschaft

# Jahrbuch 1995



---

VERLAG ERICH GOLTZE GMBH & CO. KG · GÖTTINGEN

1996



**UB Braunschweig 84**



**2747-709-8**





Braunschweigische  
Wissenschaftliche Gesellschaft

# Jahrbuch 1995

---

VERLAG ERICH GOLTZE GMBH & CO. KG · GÖTTINGEN

1996

Das vorliegende Jahrbuch ist beim Verlag und beim Buchhandel erhältlich.  
Preis DM 20,–

Gedruckt mit Hilfe von Forschungsmitteln  
des Landes Niedersachsen

BWG · 38100 Braunschweig  
Fallersleber-Tor-Wall 16, Telefon (05 31) 1 44 66

Für die Redaktion verantwortlich:  
Der Generalsekretär der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

ISSN 0931-1734  
ISBN 3-88452-241-8

Alle Rechte vorbehalten von  
Verlag Erich Goltze GmbH & Co. KG, 37079 Göttingen  
1996

Gesamtherstellung: Goltze-Druck, 37079 Göttingen  
Printed in Germany

## INHALTSVERZEICHNIS

## ALLGEMEINES UND HISTORISCHES

Zur Geschichte der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (BWG)	9
Die Organe der BWG 1943–1993 .....	10
Satzung der BWG von 1993 .....	12

## PLENARVERSAMMLUNGEN

10.2.1995	in Braunschweig <i>F. Cramer</i> : Molekulares Erkennen: 100 Jahre Schlüssel-Schloß-Hypothese durch Emil Fischer .....	17
10.3.1995	in Braunschweig <i>H.-J. Kowalsky</i> : Ultrafilter .....	19
7.4.1995	in Braunschweig <i>H. Rötting</i> : Braunschweig im hohen Mittelalter – die Stadt Heinrichs des Löwen? .....	25
12.5.1995	in Hannover <i>Chr. v. Zabeltitz</i> : Das Gewächshausklima als Grundlage für umwelt-schonende Pflanzenproduktion .....	31
8.7.1995	in Clausthal-Zellerfeld <i>K. Leschonski</i> : Die Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH ....	39
13.10.1995	in Braunschweig <i>E. Stein u. F.-J. Barthold</i> : Optimierungsprobleme in der Mechanik ..	45
10.11.1995	in Braunschweig <i>M. Bohmet</i> : Heißgasentstaubung .....	53

## KLASSENSITZUNGEN

**Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften**

10.2.1995	in Braunschweig <i>H. Welling</i> : Laser in der Ophthalmologie .....	69
12.5.1995	in Hannover <i>W. Stahl</i> : Tiefengas, eine Energie der Zukunft? .....	79

13.10.1995	in Braunschweig <i>E. Richter</i> : Über die partiellen Differentialgleichungen des magnetohydrostatischen Gleichgewichts . . . . .	89
------------	---	----

### **Klasse für Ingenieurwissenschaften**

10.2.1995	in Braunschweig <i>V. Kose</i> : Neue Entwicklungen in der Meßtechnik . . . . .	91
10.11.1995	in Braunschweig <i>H. Zenner</i> : Werkstoffermüdung - wissenschaftliche und technische Aspekte . . . . .	97

### **Klasse für Geisteswissenschaften**

10.3.1995	in Braunschweig <i>W. Thieme</i> : Die Privatisierung öffentlicher Aufgaben als verwaltungswissenschaftliches Problem . . . . .	107
10.11.1995	in Braunschweig <i>Carsten-Peter Warncke</i> : Der Grundriß als Sprachmittel einer redenden Architektur . . . . .	109

### **KOMMISSIONEN**

<i>E. Ullmann</i> , Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunst- geschichte . . . . .	111
---	-----

### **VORTRAGSREIHE**

Veranstaltungen zur Ausstellung „Heinrich der Löwe und seine Zeit“	113
--	-----

### **FEIERLICHE JAHRESVERSAMMLUNG am 16. Juni 1995**

#### **Öffentliche wissenschaftliche Vorträge**

<i>E. Steck</i> , Braunschweig: Zur Berücksichtigung von Vorgängen im Mikrobereich kristalliner Werkstoffe bei der Entwicklung von Stoffmodellen . . . .	115
<i>H. Oertel</i> , Karlsruhe: Turbulenzentstehung in kompressiblen Grenzschichtströmungen . .	131
<i>E. Kreuzer</i> , Hamburg: Chaostheorie - nützlich oder vergänglich? . . . . .	143

**Festversammlung im Altstadtrathaus**

Ansprache und Bericht des Präsidenten der BWG, <i>Prof. Dr.-Ing.</i> <i>Dr. h.c. Werner Leonhard</i> .....	157
Laudatio zur Verleihung der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 1995 an <i>Prof. Dr. David G. Crighton</i> durch <i>Oskar Mahrenholtz</i> .....	165
Dankrede und wissenschaftlicher Vortrag des Gauß-Preisträgers 1995, <i>David G. Crighton</i> .....	169
Urkunde und Lebenslauf des Preisträgers .....	178
Schlußworte des Generalsekretärs .....	181

**MITTEILUNGEN**

Veröffentlichungen .....	183
Geschäftliche Mitteilungen .....	183

**PERSONALIA**

Todesfälle .....	185
Nachrufe	
<i>Martin Grützmacher</i> .....	186
<i>Otto Rosenbach</i> .....	188
<i>Helmut Wolf</i> .....	191
<i>Edgar R. Rosen</i> .....	192
<i>Walter Renard</i> .....	196
Zuwahlen .....	198
Inhaber der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 1949–1995 .....	202
Mitgliederverzeichnis .....	205



# ALLGEMEINES UND HISTORISCHES

## Zur Geschichte der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Im Jahre 1943 führten die Initiativen einiger Professoren der Braunschweiger Technischen Hochschule Carolo Wilhelmina zur Errichtung der „Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft“. Sie wurde nach Genehmigung der vorgelegten Satzung durch den damals zuständigen Reichsminister für Wissenschaft, Erziehung und Volksbildung am 9. Dezember 1943 in einer feierlichen Sitzung konstituiert. Das zu diesem Anlaß von dem ersten Vorsitzenden des Senats der neuen Gesellschaft, Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmidt, erstattete Referat gibt Auskunft über die Motive dieser Gründung. Maßgebend war der Wunsch nach Überwindung eines allzu engen wissenschaftlichen Spezialistentums und einer einseitigen Orientierung der Forschung auf rasche Verwertbarkeit ihrer Ergebnisse. Dies wird in der ersten Satzung der Gesellschaft deutlich. In deren § 1 bestimmt sie: „insbesondere soll sie über die fachlichen Grenzen hinaus die Bearbeitung von Gemeinschaftsaufgaben übernehmen und dazu beitragen, innere Beziehungen zwischen allen Wissens- und Lebensgebieten herzustellen“. Organisatorisch war die Neugründung als selbständige wissenschaftliche Gesellschaft mit eigenen Organen (Kuratorium, Senat, Fachbereiche) angelegt. Der jeweilige Rektor der Technischen Hochschule Braunschweig war jedoch ex officio zum Präsidenten der Gesellschaft bestimmt, was hauptsächlich auf eine administrative Vereinfachung abzielte.

Bis Ende 1944 wurde die Gesellschaft durch Berufung von Mitgliedern aus verschiedenen Fachgebieten personell ausgebaut. Besondere Aktivitäten konnte sie in den letzten Monaten des zweiten Weltkrieges nicht mehr entfalten. Sie bestand auch nach dem Kriege unter einem kommissarischen Präsidenten unverändert fort. Jedoch wurden Maßnahmen eingeleitet, um die Gesellschaft uneingeschränkt zu verselbständigen, wobei die Organisationsform einer Akademie der Wissenschaften angestrebt wurde. Sie war im Kern durch Selbstergänzung und begrenzte Platzzahl der Mitglieder sowie durch Gliederung in Fachbereiche bereits vorhanden.

Vor allem wurde die Gesellschaft nun auch mit ihrem Plenum und ihren Abteilungen – seit 1950 Klassen – wissenschaftlich aktiv. In beiden Bereichen wurden wissenschaftliche Vorträge und Diskussionen durchgeführt. Initiiert von Prof. Dr. phil. Eduard Justi erschien 1949 der erste Band der als Publikationsorgan eingerichteten „Abhandlungen“. Im gleichen Jahre verlieh die Gesellschaft erstmalig die kurz zuvor gestiftete Carl-Friedrich-Gauß-Medaille. 1953 erhielt die Gesellschaft schließlich den Status einer Körperschaft des öffentlichen Rechts. Mit dem Errichtungserlaß des Niedersächsischen Landesministeriums wurde ihr zugleich eine neue Satzung gegeben, in der freilich Teile der ehemaligen Satzung erhalten geblieben waren. 1971 erhielt die Gesellschaft eine in einigen Bereichen veränderte und schließlich 1993 ihre heute gültige Satzung, die sie im Geiste einer Akademie der Wissenschaften mit deutlich technischem Schwerpunkt aus-

zufüllen bestrebt ist. In diesem Rahmen finden laufend wissenschaftliche Plenar- und Klassensitzungen statt. Zur Durchführung langfristiger Forschungsvorhaben hat die BWG eine Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte, eine Kommission für Umwelt und Technik und eine Kommission für Recht und Technik eingesetzt. Von den jährlich erscheinenden „Abhandlungen“ sind bisher 46 Bände und in der Schriftenreihe der Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte 7 Bände publiziert worden. Initiiert von Prof. Dr. techn. Karl Heinrich Olsen, veröffentlicht die BWG seit 1983 Jahrbücher, die insbesondere über Vortragsveranstaltungen, Kommissionstätigkeiten und Personalia berichten.

## **Die Organe der BWG 1943–1995**

Konstituierende Sitzung: 30. 11. 1943

Erste Sitzung des Senats: 02. 12. 1943

Eröffnungssitzung: 09. 12. 1943 [siehe Abhandlungen der BWG **21** (1969), 8]

Erste Sitzung : 1944 [siehe Abhandlungen der BWG **1** (1949), 169]

Zweite Sitzung: 1953 [siehe Abhandlungen der BWG **5** (1953), 212 ]

Dritte Sitzung: 1971 [siehe Abhandlungen der BWG **22** (1971), 291]

Vierte Sitzung: 1993 [siehe Jahrbuch der BWG **1993**, 44]

## **PRÄSIDENTEN**

1943–45: Fritz Gerstenberg, 1946–48: Gustav Gassner, 1949–50: Hans Herloff Inhoffen, 1951–53: Eduard Justi, 1954–56: Leo Pungs, 1957–59: Max Kohler, 1960–62: Hans Kroepelin, 1963–66: Paul Koeßler, 1967–70: Hermann Blenk, 1971–77: Karl Gerke, 1978–80: Herbert Wilhelm, 1981–86: Karl Hermann Olsen, 1987–92: Gerhard Oberbeck, seit 1993: Werner Leonhard

## **GENERALSEKRETÄRE**

1943–45: Ernst August Roloff, 1946–48: Wilhelm Gehlhoff, 1949–50: Eduard Justi, 1951–53: Hermann Schlichting, 1954–1959: Hans Herloff Inhoffen, 1960–61: Hellmut Bodemüller, 1962–64: Hans Joachim Bogen, 1965–69: Hermann Schaefer, 1970–71: Karl Gerke, 1972–73: Arnold Beuermann, 1974–80: Karl Hermann Olsen, 1981–82: Ulrich Wannagat, 1983–85: Hans Joachim Kanold, 1986–88: Egon Richter, 1989–91: Har-  
men Thies, 1992–94: Ulrich Wannagat, seit 1995: Helmut Braß



## VORSITZENDE DER KLASSEN

### BIS 1954 SEKRETÄRE DER ABTEILUNGEN

#### *Naturwissenschaften*

1943–47: G. Cario, 1948–50: P. Dorn, 1951–53: H. H. Inhoffen, 1954–57: P. Dorn, 1958–60: H. Kroepelin, 1961: H. Poser, 1962–64: H. Hartmann, 1965–66: H. Schumann, 1967–72: M. Grützmaker, 1973–76: U. Wannagat, 1977–80: H. R. Müller, 1981–84: E. Richter, 1985–89: O. Rosenbach, 1990–91: St. Schottlaender, 1992–94: H. J. Kowalsky, seit 1995: H. Tietz

#### *Ingenieurwissenschaften*

1943–48: E. Marx, 1949–53: L. Pungs, 1954–56: O. Flachsbar, 1957–60: W. Hofmann, 1961–64: H. Hausen, 1965–70: G. Wassermann, 1971–77: H. W. Henniecke, 1978–79: Th. Rummel, 1980–83: M. Mitschke, 1984–93: R. Jeschar, seit 1994: H.-G. Unger

#### *Bauwissenschaften*

1943–48: ?, 1949–53: Th. Kristen, 1954–62: F. Zimmermann, 1963–67: A. Pflüger, 1968–69: J. Göderitz, 1970–73: W. Wortmann, 1974: K. H. Olsen, 1975–78: H. Duddeck, 1979–83: W. Höpcke, 1984–93: J. Herrenberger (seit 1994: vereinigt mit der Klasse für Ingenieurwissenschaften)

#### *Geisteswissenschaften*

1943–48: W. Jesse, 1949–53: W. Gehlhoff, 1954–57 (Obmann): W. Jesse, 1958–61 (Obmann): H. Glockner, 1962–68 (Obmann): H. Heffter, 1969–78: A. Beuermann, 1979–87: M. Gosebruch, 1988–89: H. Boeder, 1990–91: G. Maurach, 1992–95: C.-A. Scheier

**Satzung der  
Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft  
(In Kraft seit 6.4.1993)**

§ 1

Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft hat durch eigene Tätigkeit und im Zusammenwirken mit anderen Gesellschaften der Wissenschaft zu dienen.

§ 2

Die Gesellschaft ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts. Ihr Sitz ist Braunschweig. Sie führt ein Dienstsiegel.

§ 3

Die Gesellschaft hat drei Klassen:

die Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften,  
die Klasse für Ingenieurwissenschaften,  
die Klasse für Geisteswissenschaften.

§ 4

(1) Die Gesellschaft besteht aus ordentlichen und korrespondierenden Mitgliedern.

(2) Ordentliche Mitglieder können verdienstvolle Gelehrte werden, die ihren Wohnsitz in Niedersachsen haben. Sie sind zur regelmäßigen Teilnahme an den Sitzungen des Plenums und ihrer Klassen sowie zur Förderung der wissenschaftlichen Arbeiten verpflichtet und gehalten, zu den Publikationen der Gesellschaft beizutragen. Ordentliche Mitglieder, die das 70. Lebensjahr vollendet haben, werden von den Pflichten entbunden, behalten jedoch ihre Rechte bei. Die Höchstzahl der ordentlichen Mitglieder, welche das 70. Lebensjahr noch nicht vollendet haben, beträgt:

30 für die Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften,  
40 für die Klasse für Ingenieurwissenschaften,  
30 für die Klasse für Geisteswissenschaften.

(3) Zu korrespondierenden Mitgliedern können, ohne Rücksicht auf ihren Wohnsitz, verdienstvolle Gelehrte berufen werden, denen eine regelmäßige persönliche Teilnahme an den Sitzungen und Arbeiten der Gesellschaft nicht möglich ist. Sie können an allen Sitzungen teilnehmen, haben aber kein Stimmrecht. Die Zahl der korrespondierenden Mitglieder ist nicht beschränkt.

(4) Ordentliche Mitglieder, die ihren Verpflichtungen nicht nachzukommen vermögen, können die Überführung in den Status eines korrespondierenden Mitglieds beantragen. Von ordentlichen Mitgliedern, die ohne gerechtfertigten Grund vier aufeinanderfolgenden Sitzungen des Plenums oder ihrer Klasse ferngeblieben sind, muß angenommen werden, daß sie ihren Verpflichtungen nicht mehr nachzukommen vermögen. Auf Vor-

schlag ihrer Klasse kann durch den Verwaltungsausschuß die Mitgliedschaft in die eines korrespondierenden Mitglieds umgewandelt werden.

## § 5

(1) Die Mitglieder werden auf Vorschlag von mindestens drei ordentlichen Mitgliedern und nach Antrag der zuständigen Klasse durch das Plenum in geheimer Abstimmung gewählt.

(2) Auf die Mitgliedschaft kann durch schriftliche Erklärung gegenüber dem Präsidenten verzichtet werden.

(3) Ein Mitglied kann wegen ehrenrührigen Verhaltens ausgeschlossen werden. Für das Verfahren gelten die Vorschriften über die Wahl.

## § 6

(1) Im Plenum und in den Klassen berichten die Mitglieder über eigene Arbeiten und die ihrer Mitarbeiter, die ordentlichen Mitglieder auch über Arbeiten anderer. Der Vorsitzende kann zum wissenschaftlichen Teil der ordentlichen Sitzungen Gäste, die von einem ordentlichen Mitglied eingeführt sind, einladen.

(2) Das Plenum hält in jedem Jahr mindestens eine Hauptsitzung ab. Es hört und erörtert Rechenschaftsberichte. Zu den Hauptsitzungen sind auch die korrespondierenden Mitglieder einzuladen.

## § 7

Die Gesellschaft gibt die „Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft“ sowie ein „Jahrbuch“ heraus. Einzelheiten regelt die Druckschriftenordnung.

## § 8

Die Gesellschaft kann darüber hinaus eigene Forschungsarbeiten durchführen, Forschungsarbeiten ihrer Mitglieder oder Dritter unterstützen, wissenschaftliche Stellungnahmen abgeben und wissenschaftliche Tagungen, Symposien sowie Vorträge veranstalten. Um der Öffentlichkeit Einblick in wissenschaftliche Probleme zu geben und sie mit den Ergebnissen wissenschaftlicher Arbeit bekanntzumachen, veranstaltet die Gesellschaft auch öffentliche Vorträge. Ferner kann die Gesellschaft wissenschaftliche Schriften und Berichte herausgeben oder ihre Herausgabe unterstützen.

## § 9

Die Gesellschaft verleiht, in der Regel jährlich zum Geburtstag von Carl Friedrich Gauß am 30. April, die „Carl-Friedrich-Gauß-Medaille“. Das Verfahren regeln die besonderen Bestimmungen für die Verleihung der Gauß-Medaille.

## § 10

(1) Die Leitung der Gesellschaft obliegt dem Präsidenten. Er beruft die Sitzungen des Plenums ein, stellt die Tagesordnung fest, leitet die Verhandlungen, hat bei allen mündlichen Abstimmungen für den Fall der Stimmengleichheit die entscheidende Stimme.

führt den Vorsitz in allen Ausschüssen – soweit nicht andere Regelungen getroffen sind –, unterzeichnet die Sitzungsprotokolle und sorgt für die Ausführung der Beschlüsse. Er vertritt die Gesellschaft nach außen und hat die Aufsicht über die Geschäftsführung im Benehmen mit den Klassenvorsitzenden.

(2) Der Präsident wird aus dem Kreis der ordentlichen Mitglieder durch das Plenum in geheimer Abstimmung für die Amtsdauer von drei Jahren gewählt. Wiederwahl ist zulässig. Ersatzwahlen erfolgen für den Rest der Amtsdauer.

(3) Die Stellvertretung des Präsidenten übernimmt als Vizepräsident der turnusmäßig älteste Klassenvorsitzende.

#### § 11

(1) Die Leitung der Klassen obliegt den Klassenvorsitzenden; § 10 Abs. 1 Satz 2 gilt entsprechend.

(2) Die ordentlichen Mitglieder jeder Klasse wählen aus ihrem Kreis in geheimer Abstimmung den Klassenvorsitzenden so, daß jedes Jahr einer der Klassenvorsitzenden ausscheidet. Wiederwahl ist zulässig. Ersatzwahlen erfolgen für den Rest der Amtsdauer.

(3) Die Klassenvorsitzenden betrauen mit ihrer Vertretung von Fall zu Fall ein ordentliches Mitglied der Klasse.

#### § 12

(1) Dem Generalsekretär obliegen die Geschäftsführung, die Veranstaltung öffentlicher Vorträge und die Herausgabe von Veröffentlichungen der Gesellschaft.

(2) Der Generalsekretär muß seinen Wohnsitz in Braunschweig oder im näheren Umkreis von Braunschweig haben. Er wird aus dem Kreis der ordentlichen Mitglieder durch das Plenum in geheimer Abstimmung für die Amtsdauer von drei Jahren gewählt. Wiederwahl ist zulässig. Ersatzwahlen erfolgen für den Rest der Amtsdauer. In dem Jahr, in dem der Präsident neu gewählt wird, soll ein Wechsel im Amt des Generalsekretärs nicht stattfinden.

#### § 13

Der Präsident, die Klassenvorsitzenden und der Generalsekretär bilden den Verwaltungsausschuß. Dieser hat die Aufgabe, über Arbeitsvorhaben und Arbeitsweise der Gesellschaft zu beschließen, den Haushaltsplan aufzustellen und über Inventar und Vermögen der Gesellschaft im Rahmen der Beschlußfassung des Plenums zu verfügen. Der Präsident kann zur Beratung des Verwaltungsausschusses Mitglieder der Gesellschaft und andere Persönlichkeiten, deren Teilnahme im Interesse der Gesellschaft liegt, hinzuziehen.

#### § 14

(1) Der Haushaltsplan ist vor Beginn des Haushaltsjahres (Kalenderjahr) aufzustellen und vom Plenum zu beschließen.

(2) Überschüsse früherer Jahre verbleiben der Gesellschaft; sie sind im Haushaltsplan auszuweisen.

(3) Die Gesellschaft hat nach Ende eines jeden Haushaltsjahres eine Rechnung auf-

zustellen. Die Rechnung ist, unbeschadet einer Prüfung durch den LRH nach § 111 LHO, durch die bei der Bezirksregierung Braunschweig eingerichtete Vorprüfungsstelle zu prüfen. Die Prüfung soll sich auf die Ordnungsmäßigkeit der Rechnungslegung sowie auf die wirtschaftliche und satzungsgemäße Verwendung der Mittel erstrecken.

Das Plenum beschließt ferner über die Entlastung des Verwaltungsausschusses. Die Entlastung bedarf der Genehmigung des MWK und des MF.

### § 15

Das Plenum beschließt ferner über die Geschäftsordnung, Druckschriftenordnung, Bestimmungen über die Verleihung der Gauß-Medaille und über Änderungen dieser Satzung.

### § 16

(1) Zu Wahlen und Beschlußfassungen gemäß § 14 Abs. 1 und 3 und § 15 muß mindestens die Hälfte der Anzahl der ordentlichen Mitglieder unter 70 Jahren anwesend sein.

(2) Die Wahlen und die Beschlüsse über Satzungsänderungen erfordern eine Stimmenmehrheit von zwei Dritteln aller anwesenden stimmberechtigten Mitglieder. Führt bei der Wahl des Präsidenten und des Generalsekretärs der erste Wahlgang zu keiner Zweidrittelmehrheit, so findet sofort ein zweiter Wahlgang statt. Wird auch hierbei die Zweidrittelmehrheit nicht erzielt, so ist in einem dritten Wahlgang gewählt, wer die absolute Mehrheit erreicht. Notfalls ist eine Stichwahl durchzuführen. Bei Stimmengleichheit entscheidet das Los.

(3) Bei den übrigen Beschlußfassungen und sonstigen Abstimmungen entscheidet die einfache Mehrheit der stimmberechtigten Anwesenden.

(4) Ordentliche Mitglieder können ihr Stimmrecht durch schriftliche Vollmacht auf ein anderes ordentliches Mitglied übertragen; in diesem Fall gelten sie als anwesend.

### § 17

(1) Die Wahl des Präsidenten und des Generalsekretärs bedarf der Bestätigung durch die LReg.

(2) Der Haushaltsplan und Änderungen dieser Satzung bedürfen der Genehmigung durch die LReg.

(3) Das Ergebnis der Wahlen der ordentlichen Mitglieder und der Klassenvorsitzenden, der Ausschluß eines Mitglieds und der Verzicht eines Mitglieds auf die Mitgliedschaft sind der LReg. anzuzeigen.

## Übergangsbestimmungen

Die Satzung tritt mit dem Tag der Genehmigung in Kraft. Befristet auf fünf Jahre nach dem Inkrafttreten der Satzung, können der Klasse für Ingenieurwissenschaften bis zu 45 ordentliche Mitglieder unter 70 Jahren angehören, wobei die Höchstzahl aller ordentlichen Mitglieder unter 70 Jahren in der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft auf 100 begrenzt bleibt.



# PLENARVERSAMMLUNGEN

FRIEDRICH CRAMER

## **Molekulares Erkennen: 100 Jahre Schlüssel-Schloß-Hypothese durch Emil Fischer**

Braunschweig, 10. Februar 1995\*

Den Einschluß-Verbindungen liegt ein geometrisches Prinzip zugrunde, ein Erkennen nach dem Schlüssel-Schloß-Prinzip. Ein solches Schlüssel-Schloß-Modell war schon vor hundert Jahren von Emil Fischer postuliert worden, der sagte: *„Um ein Bild zu gebrauchen, will ich sagen, daß Enzym und Substrat wie Schloß und Schlüssel zueinander passen müssen, um eine chemische Wirkung aufeinander ausüben zu können.“* Es lag also nahe, unser Einschluß-Modell auf die Schlüssel-Schloß-Vorstellung zu übertragen, und ein Erklärungsmodell für die Wirkungsweise der Enzyme zu finden.

Hierfür konnte u.a. ein kinetisches Modell konstruiert werden. Wenn Farbstoffmoleküle in den Hohlraum der Cyclodextrine eingeschlossen werden, kann man das an spektralen Veränderungen messen. Auf diese Weise ließen sich sowohl die Bindungskonstanten ermitteln als auch – mit Hilfe der schnellen Kinetik – die Bindungsgeschwindigkeiten. Der Benzolring des Farbstoffes hat eine bestimmte Affinität zum Hohlraum des Cyclodextrins, die weitgehend unabhängig von der Substitution am Benzolkern ist. Die Bindungskonstante für den Farbstoff und seine substituierten Derivate ist also praktisch gleich. Dagegen behindert ein Substituent am Benzolkern das Hineinschlüpfen des Farbstoffs in den Hohlraum. Die Verbindungsbildung wird durch eine Methylgruppe um den Faktor 100 verlangsamt. Diese „kinetische Kontrolle“ ermöglicht also ein Erkennen bzw. Unterscheiden von Molekülen mit nur kleinsten Strukturunterschieden. Der erste Schlüssel paßt glatt ins Schloß, der zweite und dritte mit der Methyl- bzw. Ethylgruppe hat einen zusätzlichen Zacken und kann nur mit Gewalt bzw. überhaupt nicht in das Schloß hineingedrückt werden. Dies ist wohl die erste exakte Beschreibung eines molekularen Schlüssel-Schloß-Erkennungsprozesses.

Man kann solche Prozesse mit katalytischen Reaktionen verbinden, wodurch man der Wirkungsweise der Enzyme modellmäßig sehr nahe kommt. So ließ sich ein Cyclodextrin mit Imidazolgruppen versehen und hatte dann eine Chymotrypsin-ähnliche Wirkung. Seither sind zahlreiche Beispiele für solche Enzym-ähnlichen Katalysen und supramolekulare katalytische Strukturen gefunden worden.

---

\* Zusammenfassung eines vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehaltenen Vortrags.

### **Literatur**

F. Cramer, W. Saenger, H.-C. Spatz: J. Chem. Soc. 89, 14 (1967)

F. Cramer, G. Mackensen: Angew. Chem. 78, 641 (1966)

F. Cramer: Erkennen als geistiger und molekularer Prozeß (Hrsg. F. Cramer), VCH Weinheim 1991

---

Prof. Dr. F. Cramer  
Max-Planck-Institut für experimentelle Medizin  
Hermann-Rein-Straße 3 · 37075 Göttingen



HANS-JOACHIM KOWALSKY, Braunschweig

## Ultrafilter

Braunschweig, 10.3.1995\*

### Einleitung

Vorbereitend soll auf die mengentheoretische Begriffsbildung des Filters eingegangen werden. Dazu sei  $X$  eine fest gewählte unendliche Menge, und  $\alpha$  sei ein nicht leeres System aus Teilmengen von  $X$ .

**Definition**  $\alpha$  heißt ein *Filter* (von  $X$ ), wenn

- (1) aus  $A_1, A_2 \in \alpha$  auch  $A_1 \cap A_2 \in \alpha$  und
- (2) aus  $A \in \alpha$  und  $A \subseteq M$  auch  $M \in \alpha$  folgt.

So ist zum Beispiel im  $\mathbb{R}^2$  das System aller Umgebungen eines Punktes  $x$ , also aller Teilmengen der Ebene, die noch eine Kreisscheibe um  $x$  mit hinreichend kleinem Radius enthalten, ein Filter, der Umgebungsfilter von  $x$ . Nimmt man aus allen diesen Umgebungen jeweils den Punkt  $x$  heraus, so bilden die punktierten Umgebungen ebenfalls einen Filter. Ein weiteres Beispiel ist das System aller Teilmengen  $A$  von  $X$ , deren Komplementärmenge  $X \setminus A$  endlich ist.

Die wesentliche Filtereigenschaft ist die Durchschnittsbedingung (1). Die zweite Forderung besagt lediglich, daß ein Filter hinsichtlich der Obermengenbildung aufgefüllt ist. Dem trägt die folgende Begriffsbildung Rechnung.

**Definition** Ein nicht leeres System  $\mathfrak{B}$  aus Teilmengen von  $X$  heißt *Filterbasis*, wenn zu  $B_1, B_2 \in \mathfrak{B}$  stets ein  $B \in \mathfrak{B}$  existiert mit  $B \subseteq B_1 \cap B_2$ .

**Satz** Ist  $\mathfrak{B}$  eine Filterbasis, so ist  $\mathfrak{B} = \{A \mid B \subseteq A \subseteq X \text{ für ein } B \in \mathfrak{B}\}$  ein Filter, der von  $\mathfrak{B}$  erzeugte Filter.

Ein aus nur einer Menge bestehendes System  $\mathfrak{B} = \{B\}$  ist eine besonders einfache Filterbasis. Der von ihr erzeugte Filter wird einfacher mit  $\mathfrak{B}$  bezeichnet und der von der Menge  $B$  erzeugte Hauptfilter genannt. Er besteht aus allen Obermengen von  $B$ . Wichtige Spezialfälle sind der Hauptfilter  $X$ , der nur aus der Menge  $X$  besteht, und der Filter  $\emptyset = \emptyset$ , der das System aller Teilmengen von  $X$  ist und Nullfilter genannt werden soll.

In der Menge  $\mathbb{F}$  aller Filter von  $X$  wird durch die mengentheoretische Inklusion eine Ordnungsrelation definiert. Hier soll allerdings die zu ihr inverse Relation benutzt werden.

---

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

**Definition** Für Filter  $\alpha, \flat \in \mathbb{F}$  sei  $\alpha \leq \flat$  ( $\alpha$  feiner oder gleich  $\flat$ ) durch  $\alpha \supseteq \flat$  erklärt.

Hiernach ist  $\alpha \leq \flat$  gleichwertig damit, daß aus  $B \in \flat$  stets auch  $B \in \alpha$  folgt. Für jeden Filter  $\alpha \in \mathbb{F}$  gilt  $\flat \leq \alpha \leq \hat{X}$ , weswegen  $\hat{X}$  hinsichtlich dieser Ordnung der grösste und der Nullfilter  $\flat$  der feinste Filter ist.

**Satz**  $\mathbb{F}$  ist bezüglich  $\leq$  ein vollständiger Verband: Es existieren in  $\mathbb{F}$  beliebige Vereinigungsfiler  $\bigvee \alpha_i$  und Durchschnittsfiler  $\bigwedge \alpha_i$ , wobei

$$\begin{aligned} \{\bigcup A_i \mid A_i \in \alpha_i \text{ für alle } i\} &\text{ eine Filterbasis von } \bigvee \alpha_i \text{ und} \\ \{A_i \cap \dots \cap A_i \mid A_i \in \alpha_{i_1}, \dots, A_{i_n} \in \alpha_{i_n}\} &\text{ eine Filterbasis von } \bigwedge \alpha_i \end{aligned}$$

ist.

Bei dieser Wahl der Ordnungsrelation entsprechen also der Vereinigungs- und Durchschnittsbildung bei den Filtern die analogen Operationen bei den Filtermengen, wobei allerdings im Fall des Durchschnittsfilters nur der Durchschnitt von jeweils endlich vielen Filtermengen zu bilden ist.

## 1. Ultrafilter

Im Filterverband  $\mathbb{F}$  besitzt der Nullfilter unmittelbare obere Nachbarn, die als Ultrafilter bezeichnet werden.

**Definition** Ein Filter  $\mathfrak{u}$  heißt Ultrafilter, wenn  $\mathfrak{u} > \flat$  gilt und wenn aus  $\flat \leq \alpha < \mathfrak{u}$  stets  $\alpha = \flat$  folgt.

Der mit einem einzelnen Element  $x$  gebildete Hauptfilter  $\hat{x} = \{x\}$  ist ein Ultrafilter, den man auch als den an  $x$  gebundenen Ultrafilter bezeichnet. Ultrafilter, die nicht in diesem Sinn gebunden sind, werden freie Ultrafilter genannt. Bezeichnet  $\mathbb{U}$  die Menge aller und  $\mathbb{U}_f$  die Menge der freien Ultrafilter, so gilt  $|\mathbb{U}_f| = |\mathbb{U}| = |\mathbb{F}| = 2^{2^X}$ . Man kann auch Konstruktionsverfahren für freie Ultrafilter angeben. Aber eine explizite Beschreibung freier Ultrafilter ist nicht möglich; ihre Struktur überfordert die Vorstellungskraft.

**Satz** (1) Ein Filter  $\mathfrak{u}$  ist genau dann ein Ultrafilter, wenn für alle Teilmengen  $M$  von  $X$  entweder  $M \in \mathfrak{u}$  oder aber  $X \setminus M \in \mathfrak{u}$  gilt.

(2) Für jeden Filter  $\alpha \neq \flat$  gilt  $\alpha = \bigvee \{\mathfrak{u} \mid \mathfrak{u} \in \mathbb{U}, \mathfrak{u} \leq \alpha\}$ .

Aus dem zweiten Teil des Satzes folgt insbesondere, daß jeder vom Nullfilter verschiedene Filter zu einem Ultrafilter verfeinert werden kann.

Ultrafilter sind ein wichtiges Hilfsmittel zum Beispiel bei Vervollständigungsprozessen, wie etwa Kompaktifizierungen, und in der Modelltheorie zur Konstruktion ungewöhnlicher Modelle von Axiomensystemen.

Als Beispiel diene eine Folge  $(K_v)_{v \in \mathbb{N}}$  von beliebigen Körpern. Ihre Produktmenge  $P = \prod_{v \in \mathbb{N}} K_v$  besteht aus allen Folgen  $x = (x_v)$  mit  $x_v \in K_v$  für alle Indizes  $v$ . Hinsichtlich

der komponentenweise definierten Operationen  $x \pm y = (x_v \pm y_v)$  ist dann  $P$  ein Ring mit  $(0) = (0, 0, \dots)$  als Nullelement und mit  $(1) = (1, 1, \dots)$  als Einselement.  $P$  ist aber kein Körper, weil zum Beispiel  $(1, 0, 1, 0, \dots)$  zwar vom Nullelement verschieden, aber nicht invertierbar ist.

Es sei nun weiter  $\mathfrak{u}$  ein freier Ultrafilter der Indexmenge  $\mathbb{N}$ . Für beliebige Folgen  $x = (x_v)$  und  $y = (y_v)$  aus  $P$  sei dann die Relation  $x \sim y$  dadurch erklärt, daß es eine Menge  $U \in \mathfrak{u}$  gibt, so daß  $x_v = y_v$  für alle  $v \in U$  erfüllt ist. Unmittelbar ergibt sich, daß  $\sim$  eine mit den Ringoperationen vertauschbare Äquivalenzrelation ist, so daß die Menge  $\hat{P}$  der Äquivalenzklassen  $\hat{x}$  von Folgen  $x \in P$  wieder ein Ring ist. Dieser Ring  $\hat{P}$  ist aber sogar ein Körper: Es sei nämlich  $(x_v)$  eine von  $(\hat{0})$  verschiedene Äquivalenzklasse, und  $M$  sei die Menge aller Indizes  $v$  mit  $x_v \neq 0$ . Aus  $M \in \mathfrak{u}$  würde  $(x_v) = (\hat{0})$  im Widerspruch zur Voraussetzung folgen. Da  $\mathfrak{u}$  ein Ultrafilter ist, muß also  $\mathbb{N} \setminus M = \{v \mid x_v = 0\} \in \mathfrak{u}$  erfüllt sein. Setzt man nun  $y = \frac{1}{x_v}$  für  $v \in \mathbb{N} \setminus M$  und  $y_v = 1$  für  $v \in M$ , so ist  $(y_v)$  gerade die zu  $(x_v)$  inverse Klasse.

Wählt man bei dieser Konstruktion  $K_v = \mathbb{Z}_{p_v}$ , wobei  $p_v$  die  $v$ -te Primzahl ist, so erhält man als resultierenden Körper  $\hat{P}$  einen Körper der Charakteristik Null. Bei fester Wahl der Körper  $K_v$  hängt die Struktur von  $\hat{P}$  aber noch entscheidend von der Wahl des Ultrafilters  $\mathfrak{u}$  von  $\mathbb{N}$  ab.

## 2. Präordnung, primitive Filter

Es sei  $\alpha$  ein Filter von  $X$ , und  $\varphi: X \rightarrow X$  sei eine Abbildung. Dann ist  $\mathfrak{B} = \{\varphi A \mid A \in \alpha\}$  eine Filterbasis.

**Definition**  $\hat{\varphi}\alpha := \mathfrak{B}$  wird der Bildfilter von  $\alpha$  bei der Abbildung  $\varphi$  genannt.

**Satz** Ist  $\mathfrak{u}$  ein Ultrafilter, so ist auch  $\hat{\varphi}\mathfrak{u}$  ein Ultrafilter.

**Definition** Für Ultrafilter  $\mathfrak{u}_1, \mathfrak{u}_2$  sei  $\mathfrak{u}_1 \leq \mathfrak{u}_2$  dadurch definiert, daß es eine Abbildung  $\varphi: X \rightarrow X$  mit  $\hat{\varphi}\mathfrak{u}_2 = \mathfrak{u}_1$  gibt.

Die so definierte Relation  $\leq$  ist eine Präordnung auf  $\mathfrak{U}$ . Die zu ihr gehörende Äquivalenzrelation  $\approx$  ist dadurch erklärt, daß  $\mathfrak{u}_1 \approx \mathfrak{u}_2$  gleichwertig mit  $\mathfrak{u}_1 \leq \mathfrak{u}_2$  und  $\mathfrak{u}_2 \leq \mathfrak{u}_1$  ist.

Die durch  $\leq$  bestimmte Ordnungsbeziehung auf  $\mathfrak{U}$  führt zu verhältnismäßig übersichtlichen Bedingungen, wenn die Grundmenge  $X$  lediglich abzählbar ist, wenn also eine Bijektion  $\psi: X \rightarrow \mathbb{N}$  existiert. Dies sei von jetzt an stets vorausgesetzt.

**Definition** Eine Abbildung  $\varphi: X \rightarrow X$  heißt auf einem gegebenen Filter  $\alpha$  injektiv, wenn es eine Filtermenge  $A \in \alpha$  gibt, so daß die Einschränkung von  $\varphi$  auf  $A$  eine injektive Abbildung ist.

Ein Filter  $\mathfrak{p}$  von  $X$  soll *primitiv* genannt werden, wenn er ein freier Ultrafilter ist und wenn für jede Abbildung  $\phi: X \rightarrow X$  gilt:  $\hat{\phi}\mathfrak{p}$  ist ein gebundener Ultrafilter oder  $\phi$  ist auf  $\mathfrak{p}$  injektiv.

Primitive Filter gibt es nur auf abzählbaren Mengen. Im Sinn der Präordnung  $\trianglelefteq$  sind sie obere Nachbarn der gebundenen Ultrafilter.

**Satz**  $\mathfrak{p}$  ist genau dann primitiv, wenn für jede Zerlegung  $\{Z_v \mid v \in \mathbb{N}\}$  von  $X$  gilt: Es gibt ein  $v$  mit  $Z_v \in \mathfrak{p}$ , oder es gibt ein  $P \in \mathfrak{p}$  mit  $|P \cap Z_v| \leq 1$  für alle  $v$ .

Ist  $\{\mathfrak{p}_v \mid v \in \mathbb{N}\}$  eine Menge paarweise verschiedener primitiver Filter, dann gibt es eine Zerlegung  $\{Z_v \mid v \in \mathbb{N}\}$  von  $X$  mit  $Z_v \in \mathfrak{p}_v$  für alle  $v$ .

Auf einer abzählbaren Grundmenge gibt es kontinuierlich viele primitive Filter.

Mit Hilfe primitiver Filter können induktiv kompliziertere Ultrafilter konstruiert werden.

**Satz** Es sei  $\{\mathfrak{p}_x \mid x \in X\}$  ein System paarweise verschiedener primitiver Filter, und  $\mathfrak{u}$  sei ein Ultrafilter von  $X$ . Dann ist auch

$$\alpha = \bigwedge_{U \in \mathfrak{u}} \bigvee_{x \in U} \mathfrak{p}_x$$

ein Ultrafilter von  $X$  und bezüglich  $\trianglelefteq$  ein oberer Nachbar von  $\mathfrak{u}$ .

Beginnend mit einem primitiven Filter  $\mathfrak{u}_0$  kann man so aufsteigende Ketten  $\mathfrak{u}_0 \trianglelefteq \mathfrak{u}_1 \trianglelefteq \mathfrak{u}_2 \trianglelefteq \dots$  benachbarter Ultrafilter konstruieren mit Abbildungen  $\phi_{\mu, \nu}$  ( $\mu < \nu$ ), für die  $\hat{\phi}_{\mu, \nu} \mathfrak{u}_\nu = \mathfrak{u}_\mu$  und  $\phi_{\mu, \rho} = \phi_{\mu, \nu} \circ \phi_{\nu, \rho}$  gilt.

Das Konstruktionsverfahren läßt sich fortsetzen.

**Satz** Es sei  $(\mathfrak{u}_\nu, \phi_{\mu, \nu})$  eine Folge von Ultrafiltern und Abbildungen mit  $\hat{\phi}_{\mu, \nu} \mathfrak{u}_\nu = \mathfrak{u}_\mu$  ( $\mu < \nu$ ) und  $\phi_{\mu, \rho} = \phi_{\mu, \nu} \circ \phi_{\nu, \rho}$ , und  $\mathfrak{v}^*$  sei ein freier Ultrafilter von  $\mathbb{N}$ . Dann ist

$$\mathfrak{w} = \bigwedge_{V^* \in \mathfrak{v}^*} \bigvee_{v \in V^*} \mathfrak{u}_v$$

ein Ultrafilter, zu dem Abbildungen  $\psi_\nu$  mit  $\hat{\psi}_\nu \mathfrak{w} = \mathfrak{u}_\nu$  und mit  $\psi_\mu = \phi_{\mu, \nu} \circ \psi_\nu$  existieren.

Der Ultrafilter  $\mathfrak{w}$  ist im Sinne der Präordnung  $\trianglelefteq$  zwar eine obere Schranke der Folge  $(\mathfrak{u}_\nu)$ , nicht aber ein Supremum. Ein solches existiert auch nicht. Es gibt unendliche absteigende Folgen oberer Schranken, und bei jedem Limeschritt wiederholt sich die bisher gewonnene Schichtung der Ultrafilter jeweils als beiderseitig unendliche Folge von ordnungsisomorphen Exemplaren.

Alle Ultrafilter, die sich mit Hilfe dieses Konstruktionsverfahrens in abzählbar vielen Schritten erreichen lassen, sollen abzählbar-primitive Ultrafilter genannt werden. Eine Fortsetzung der Konstruktion über den Rahmen dieser Ultrafilter hinaus ist zwar möglich, erfordert aber eine Verallgemeinerung der bisherigen Präordnung: Es sei  $\eta$  die erste überabzählbare Anfangszahl, und  $(\mathfrak{u}_\iota)_{\iota < \eta}$  sei eine Ultrafilterkette mit Abbildungen

$\varphi_{\iota, \kappa}$  ( $\iota < \kappa < \eta$ ), für die entsprechend  $\hat{\varphi}_{\iota, \kappa} u_\kappa = u_\iota$  und  $\varphi_{\iota, \lambda} = \varphi_{\iota, \kappa} \circ \varphi_{\kappa, \lambda}$  ( $\iota < \kappa < \lambda < \eta$ ) gilt. Ferner sei  $v^*$  jetzt ein Ultrafilter der überabzählbaren Indexmenge  $\eta$ . Dann ist zwar

$$w = \bigwedge_{v^* \in v^*} \bigvee_{\iota \in v^*} u_\iota$$

wieder ein Ultrafilter. Es gibt jetzt aber keine Abbildungen  $\psi_\iota$  mit  $\hat{\psi}_\iota w = u_\iota$  und  $\psi_\iota = \varphi_{\iota, \kappa} \circ \psi_\kappa$ . Die bisherige Präordnung  $\triangleleft$  reicht daher beim Verlassen des Bereichs der abzählbar-primitiven Ultrafilter nicht mehr aus. Es bedarf somit einer Verallgemeinerung. Auf eine entsprechende Möglichkeit soll jetzt noch abschließend eingegangen werden.

### 3. Filterabbildungen

Die Grundmenge  $X$  braucht jetzt zunächst nicht abzählbar zu sein. Als Filterabbildungen sollen beliebige Abbildungen  $\psi: \mathbb{F} \rightarrow \mathbb{F}$  bezeichnet werden. Jede Punktabbildung  $\varphi: X \rightarrow X$  induziert eine Filterabbildung  $\hat{\varphi}: \mathbb{F} \rightarrow \mathbb{F}$ . In diesem Sinn kann man Filterabbildungen als Verallgemeinerungen von Punktabbildungen auffassen. Um spezielle Filterabbildungen kennzeichnen zu können, zunächst eine vorbereitende Begriffsbildung.

**Definition** Es sei  $M^*$  eine Teilmenge von  $\mathbb{F}$ .

$M^*$  heißt *filtrierend*, wenn zu je zwei Filtern  $\alpha, \beta \in M^*$  ein  $\gamma \in M^*$  existiert mit  $\gamma \leq \alpha \wedge \beta$ .

$M^*$  heißt *saturiert*, wenn zu jedem Ultrafilter  $u$  mit  $u \leq \bigvee_{\alpha \in M^*} \alpha$  ein Filter  $\alpha_0 \in M^*$  existiert mit  $u \leq \alpha_0$ .

Es soll nun eine spezielle Klasse von Filterabbildungen ausgezeichnet werden, die enger mit Ultrafiltern verknüpft sind und die daher kurz als U-Abbildungen bezeichnet werden sollen.

**Definition** Eine Filterabbildung  $\psi$  heißt *U-Abbildung*, wenn sie die beiden folgenden Eigenschaften besitzt:

- (1) Für jede filtrierende Menge  $M^*$  gilt  $\psi \left( \bigwedge_{\alpha \in M^*} \alpha \right) = \bigwedge_{\alpha \in M^*} \psi \alpha$ .
- (2) Zu jedem Filter  $\alpha$  und zu jedem Ultrafilter  $u^*$  mit  $u^* \leq \psi \alpha$  gibt es einen Ultrafilter  $u$  mit  $u \leq \alpha$  und  $\psi u = u^*$ .

Die von Punktabbildungen  $\varphi: X \rightarrow X$  induzierten Filterabbildungen  $\hat{\varphi}$  sind U-Abbildungen. Die Klasse der U-Abbildungen ist jedoch wesentlich umfangreicher. Andererseits kann man ein Konstruktionsverfahren für U-Abbildungen angeben, das einem einen gewissen Überblick über diese Klasse verschafft.

**Satz** Es sei  $\psi$  eine U-Abbildung. Dann gilt:

- (1) Aus  $\alpha \leq \beta$  folgt  $\psi \alpha \leq \psi \beta$ .
- (2) Ist  $u$  ein Ultrafilter, so ist auch  $\psi u$  ein Ultrafilter, oder es gilt  $\psi u = \emptyset$ .

(3) Ist  $M^*$  saturiert, so folgt  $\psi \left( \bigvee_{\alpha \in M^*} \alpha \right) = \bigvee_{\alpha \in M^*} \psi \alpha$ .

(4) Für alle Filter  $\alpha$  ist  $\psi \alpha = \bigwedge_{A \in \alpha} \bigvee_{\substack{B \leq A \\ B \in \mathbb{U}_f}} \psi B$ .

Sind  $\psi$  und  $\chi$  U-Abbildungen, so ist auch  $\chi \circ \psi$  eine U-Abbildung.

Mit Hilfe von U-Abbildungen kann nun wieder eine Präordnung für Ultrafilter erklärt werden.

**Satz** Es sei  $\Psi$  eine Menge von U-Abbildungen, die alle von Punktabbildungen induzierte Filterabbildungen und mit  $\psi, \chi$  stets auch  $\chi \circ \psi$  enthält. Definiert man  $\mathbb{U}_1 \ll \mathbb{U}_2$  für  $\mathbb{U}_1, \mathbb{U}_2 \in \mathbb{U}$  durch die Existenz eines  $\psi \in \Psi$  mit  $\psi \mathbb{U}_2 = \mathbb{U}_1$ , so ist  $\ll$  eine Präordnung und eine Vergrößerung von  $\leq$ .

Mit derartigen Präordnungen kann nun das im vorangehenden Abschnitt behandelte Konstruktionsverfahren auch im Fall überabzählbarer Ultrafilterfolgen durchgeführt werden, wobei nur an die Stelle der fehlenden Punktabbildungen  $\psi_i$  jetzt U-Abbildungen treten. Allerdings sind hinsichtlich  $\ll$  die erhaltenen Niveauschichten wesentlich größer. Man muß sich daher bemühen, durch eine geeignete Wahl von  $\Psi$  eine Beschränkung zu erreichen, so daß die Niveauschichten danach wieder hinsichtlich der Präordnung  $\leq$  untergliedert werden können. Hierfür bietet sich im Fall einer wieder abzählbaren Grundmenge die Menge  $\Psi$  aller derjenigen U-Abbildungen  $\psi$  an, die die Menge der abzählbar-primitiven Ultrafilter in sich abbilden und die außerdem für abzählbar-primitive Ultrafilter  $\mathbb{U}$  noch  $\psi \mathbb{U} \leq \mathbb{U}$  erfüllen.

HARTMUT RÖTTING, Wolfenbüttel

## **Braunschweig im hohen Mittelalter – die Stadt Heinrichs des Löwen?**

Braunschweig, 7. April 1995\*

Das Thema „Braunschweig als Stadt im hohen Mittelalter“ stellt sich dem Archäologen als Untersuchung des materiellen Überrestes dar: gleichsam als eine Realie, die er vergleichend, stichprobenartig und großflächig auszugraben hat. Dies bedeutet beispielsweise bei einer archäologisch zu beantwortenden alltagskulturellen Fragestellung nach einer sich herausbildenden städtischen Siedlungsform und Lebensweise, daß Topographie, Hausbau und Grundstücksbebauung und deren Wandel bzw. Kontinuität vor allem zu untersuchen sind.

Eine volkstümliche, noch heute werbewirksame Instrumentalisierung erschlossener wie hypothetisch abgeleiteter früher Stadtgeschichte hat im Verlauf einer historistischen Heinrich-Rezeption Braunschweig um die Jahrhundertwende als „die Stadt Heinrichs des Löwen“ bezeichnet.

### **Die Entstehung der Gruppenstadt**

Archäologisch ist zu untersuchen und zu bestimmen, welche Anteile dieser mitteleuropäisch einzigartigen, fünfteiligen Gruppenstadtentstehung jeweils auf brunonische oder auf welfische Einwirkung zurückzuführen sind und welche insbesondere auf die Stadtherrschaft Heinrichs des Löwen selbst zurückgehen. Die Mitarbeit des Archäologen, das Dunkel um die Herausbildung der gruppenstädtischen Frühzeit aufzuhellen, wird mit Nachdruck auch von Seiten des Historikers erwartet.

Auf der Basis gegenwärtig verfügbarer archäologischer Quellen, die den über 100 Ausgrabungen der Jahre 1976–1992 entstammen und die sich auf alle fünf hochmittelalterlichen Städte Braunschweigs verteilen, ist zumindest die südliche Altstadt westlich St. Jakobi als eine brunonisch intendierte frühe Stadtbildung des ausgehenden 11. Jahrhunderts zu bestimmen.

---

\* Quellenmäßig erweiterte Zusammenfassung des Vortrages vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft. Vorberichte mit gleicher Thematik werden 1996 erscheinen in: *Bamberger Schriften zur Archäologie des Mittelalters und der Neuzeit 1*, hrsg. von Ingolf Ericsson, Bamberg: Stadtarchäologie in Braunschweig 1976–1992 – ein Resümee zu Quellenbestand, Topographie und Hausbau. *Památky archeologické, Supplementa 4*, Prag: Hausbau und Raumstruktur früher Städte in Ostmitteleuropa. Das ostsächsische Doppelhaus des hohen Mittelalters im archäologisch-rechtshistorischen Befund von Braunschweig. *Encyclopedia of Medieval Archaeology*, hrsg. von Pam J. Crabtree, New York City: Brunswick.

In der zweiten Hälfte des 12. Jahrhunderts wurde *BRV.NESIVVIC* auf der westlichen Niederterrasse der Oker mit dem Hagen, nach Landgewinnungsmaßnahmen in der Oker-  
 aue, unter Herzog Heinrich dem Löwen zur Doppelstadt *Bruneswich* erweitert (Abb. 1).

Bereits zur Zeit der Stadtherrschaft des welfischen Kaisers Otto IV., kurz nach 1200, sind die noch im vorstädtischen Stadium befindlichen Siedlungen Neustadt und Alten-  
 wiek wie auch der Vorburgbereich, der spätere Sack, ergänzend in den Gesamtbering der  
 Stadt mit Mauer und Graben aufgenommen worden.

Erstmalig wird die Neustadt, nördlich einer Bachniederung gelegen, an deren südli-  
 chem Rande sich zunächst die Altstadtmauer hinzog (Abb. 1) nach größeren Landgewin-  
 nungsmaßnahmen um 1200, als *nova civitas in Bruneswich* 1231 erwähnt.

Abgestufte Rechte erhielt 1240/45 die nach der archäologischen Quellenlage eben-  
 falls seit dem 9./10. Jahrhundert bestehende agrarische Ansiedlung der Altenwiek (Dorf  
*brunesguik* von 1031) auf dem östlichen Okerufer. Zuletzt erreichte spätestens um 1300  
 der Sack, der ehemalige südwestliche Vorburgbereich des 12. Jahrhunderts, eine gemin-  
 derte Stadtrechtsbewidmung.

Im rechtlichen Sinn ist die Entstehung der fünfteiligen Gruppenstadt erst für das 13.  
 Jahrhundert in mehreren Schritten zu belegen.

Hinsichtlich der siedlungsgenetischen und topographischen Fragen ist „die Stadt  
 Heinrichs des Löwen“ demnach auf die Doppelstadt der zweiten Hälfte des 12. Jahrhun-  
 derts zu beschränken. Einerseits können jedoch der bedeutende, ältere brunonische  
 Gründungsanteil der Stadtentstehung wie auch die gleichzeitige Herausbildung eines  
 Kaufmannshauses (des Doppelhauses) und andererseits vor allem die jüngeren wel-  
 fischen Stadtaktivitäten zur erweiterten Gruppenstadt ab um 1200 nachgewiesen wer-  
 den.

## Die frühe Stadt

Die brunonische Burgstadt *BRV.NESIVVIC*, die nach ihrer frühstädtischen, archäolo-  
 gischen Überlieferung gemäß den von der Mittelalterarchäologie und Rechtsgeschichte  
 definierten Begriffen erschlossen werden konnte, wurde in einer fünfeinhalbjährigen  
 Plangrabung der Jahre 1985 bis 1990 in einem Teilflächenbereich der südlichen Altstadt  
 auf rund 16 000 Quadratmetern westlich St. Jakobi, südlich St. Martini, beiderseits der  
 Turnierstraße ausgegraben (Abb. 1).

Das Siedlungsgeschehen seit um 1065 dc unter den brunonisch-braunschweigischen  
 Grafen Ekbert I. (1038–1068) und Ekbert II. (1068–1090) basiert auf grundstücksgebun-  
 denen Erst- und Folgeserien dendrochronologischer Brunnendatierungen, die die Bebau-  
 ung und Alltagskultur zeitlich gliedern können.

Die wesentlichen Gestaltungselemente beziehen sich neben der vorangehenden Burg-  
 gründung im 10. Jahrhundert auf die Wegestruktur, das Grundstücksgefüge, die geregel-  
 te Bebauung mit Wohnhaus, Speicher, Brunnen, Entsorgungsobjekten im Quartier  
 St. Jakobi–Turnierstraße sowie auf die großräumige Stifts-, Kloster- und Pfarrkirchen-  
 struktural, die eine zentralörtliche Funktion der frühstädtischen Besiedlung belegt. Eine



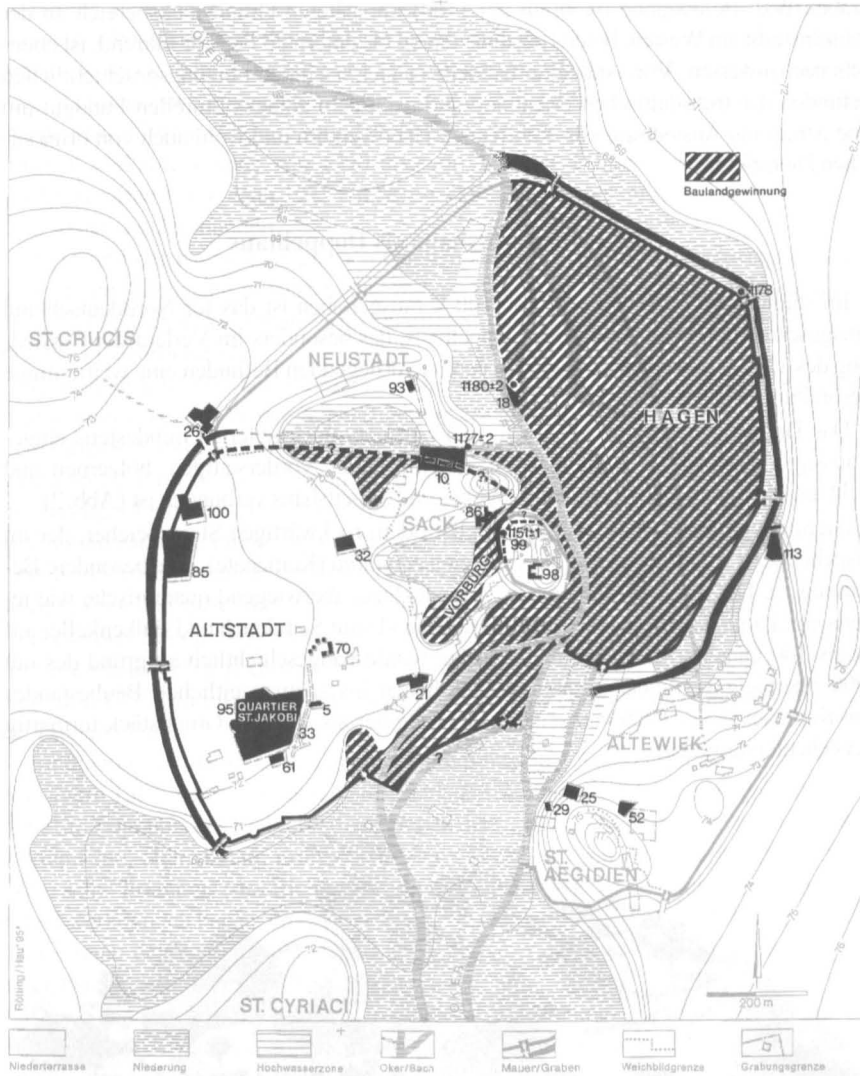


Abb. 1:

*Braunschweig, Doppelstadt Brunswich unter Herzog Heinrich dem Löwen nach Landgewinnungsmaßnahmen, 2. Hälfte 12. Jahrhundert.*

Graben-Wall-Befestigung (wohl ab um 1100) im späteren Grundstücksbereich an der Echternstraße im Westen, bereits nördlich davon bis unterhalb Petritor führend, ist ebenfalls nachzuweisen. Von Anbeginn handelte es sich nach den nutzungsgeschichtlichen Befunden der frühstädtischen Bebauung und nach dem alltagskulturellen Fundgut um eine gemischte Ansiedlung von Kaufleuten, Handwerkern und wohl auch von brunonischen Dienstleuten.

### Das Kaufmannshaus als Doppelhaus

Im städtischen Wohnbau seit um 1100 herausgehoben ist das für Norddeutschland hausgeschichtlich bemerkenswerte Doppelhaus, das besonders im Verlauf der Ostsiedlung des 12./13. Jahrhunderts nach den bereits vorliegenden Befunden eine weiträumige Verbreitung erfährt.

Das Doppelhaus besteht aus einem rückwärtigen, unterkellerten mindestens eingeschossigen Speicher in Steinbauweise, der mit einem vorderseitigen, hölzernen und nicht unterkellerten, wegeorientierten Wohn- und Arbeitshaus verbunden ist (Abb. 2).

Architekturgeschichtlich kommt vor allem dem rückwärtigen Steinspeicher, der im ausgehenden 13. Jahrhundert so bezeichneten *caminata* (Kemenate), eine besondere Bedeutung zu. Das zu dieser Zeit relativ schmucklose, überwiegend quadratische wie jeweils einräumig doppelgeschossige Massivgebäude mit Satteldach und Balkenkeller auf 50 bis 100 Quadratmetern bebauter Fläche, wurde baugeschichtlich aufgrund des um 1900 obertägig verfügbaren spätmittelalterlichen bis spätneuzeitlichen Baubestandes von Karl Steinacker 1926 von seinem Ursprung her als auf dem Grundstück turmartig freistehend interpretiert.



Abb. 2:

Braunschweig-Altstadt. Das Modell Quartier St. Jakobi – Turnierstraße, um 1230, mit dem als Kaufmannshaus genutzten Doppelhaus.

Museumsfoto: Keiser, Herzog Anton Ulrich-Museum Braunschweig.

Bereits Helmuth Thomsen widersprach 1937 in seiner Dissertation über den Braunschweiger Wohnungsbau dieser These Steinackers und legte norddeutsche Schriftquellen aus Rostock, Kiel, Lüneburg und Hildesheim vor, die um 1300 auf den Zusammenhang rückwärtiger Kemenaten mit einem straßenseitigen Holzhaus hinweisen. Roswitha Poppe bekräftigte 1944 diese grundsätzliche Widerlegung noch einmal mit einer Osnabrücker Verkaufsurkunde von 1290 über ein *ligneam domum cum caminata*. Rudolf Fricke veröffentlichte dann 1975 ein Braunschweiger Modell zu einem Doppelhaus aus dem späten 13. Jahrhundert.

Aufgrund der bauarchäologischen Quellen beginnt nun die Braunschweiger Baugeschichte der Kemenate in Verbindung mit einem hölzernen Vorderbau, d. h. mithin die Baugeschichte des Doppelhauses im Quartier St. Jakobi-Turnierstraße, bereits im ausgehenden 11. Jahrhundert.

Kennzeichnend für den Steinspeicher der Gründungszeit, der nach 1200 auch eine (mit Kamin heizbare) Wohnspeicherfunktion erhalten kann, sind neben einem trapezoidem Grundriß und Raumgrößen zwischen 15 und 18 Quadratmetern vor allem erstens: eine geringe, um 1,30 m betragende Kellereintiefung, zweitens: ein für die Begehrbarkeit notwendiges kniehohes, d. h. um mindestens 0,70 m ab Geländeoberkante erhöhtes Erdgeschoßniveau und drittens: ein Anhängen des Gebäudes an das Vorderhaus, zunächst mittels einer Kellerrampe, die bereits kurz nach 1100 in das Vorderhaus eingeschoben werden kann und später mit einem inneren Zugang in das Erdgeschoß ergänzt wird.

Diese drei Baumerkmale sind auf sächsische Rechtsgewohnheit zurückzuführen, die im wesentlichen in den Bauvorschriften des Sachsenspiegels, der in den Jahren zwischen 1220 und 1235 von Eike von Repgow im nordöstlichen Harzvorland aufgezeichnet wurde, Eingang fand.

Im *liber consulum in Brunswig*, einer Braunschweiger Sachsenspiegelhandschrift aus dem Jahre 1367, heißt es wie in den Bilderhandschriften des Sachsenspiegels, daß man ohne die Erlaubnis des Richters so tief graben darf, „wie ein Mann mit einem Spaten aufwerfen kann, ohne daß im Erdreich ein Absatz entsteht noch absichtlich gemacht wird. Ohne seine Erlaubnis (des Richters, Red.) kann man mit Holz oder mit Stein drei Dälen (Stockwerke) hoch bauen, eine über die andere, eine in der Erde, die anderen beiden darüber – unter der Bedingung, daß man kniehoch über der Erde eine Tür im unteren Gemach (Stockwerk) anlegt.“

Der Steinspeicher des Doppelhauses, die autochthone ostwestfälisch-sächsische Steinbauform des angebauten und erhöhten *Ghadem*, ist von seiner Herkunft her gleichsam als eine idealtypische Transformation des in Vorrats-, Arbeits- oder auch Wohnnutzung stehenden älteren Grubenhauses abzuleiten.



CHRISTIAN VON ZABELTITZ, Hannover

## **Das Gewächshaus als Grundlage für umweltschonende Pflanzenproduktion**

Hannover, 12.5.1995\*

### **Einleitung**

Gewächshäuser sind begehbare Bauten mit einer lichtdurchlässigen Außenhülle, die die erforderlichen Wachstumsbedingungen für eine ganzjährige Pflanzenproduktion schaffen sollen. Die Wachstumsfaktoren Licht, Temperatur, Luftfeuchte, Luftzusammensetzung und Wasser müssen optimal so zur Verfügung gestellt werden, daß unter weitestgehender Schonung der Umwelt möglichst geringer Aufwand für Investition und Unterhaltung entsteht (1). Ziele der technischen Entwicklung müssen sein:

- die ökonomische Optimierung
- die Rationalisierung
- die ökologische Optimierung.

Der Gartenbau hat eine erhebliche Bedeutung im Agrarbereich Deutschlands, insbesondere durch die intensive Produktion von Zierpflanzen, Gemüse, Obst und Baumschulpflanzen. Auf etwa 1% der landwirtschaftlich genutzten Fläche werden etwa 41% der Erlöse aus pflanzlicher Produktion erzielt. Jeder Bundesbürger kauft jährlich für durchschnittlich 120,- DM Zierpflanzen und ißt jährlich 80 bis 90 kg Gemüse. Die meisten Zierpflanzen werden im Sommer und Winter in Gewächshäusern produziert, ebenso wichtige Gemüsearten wie Tomaten, Gurken und Paprika. In Deutschland gibt es heute etwa 4.300 ha Gewächshausfläche, in den Niederlanden 9.800 ha, in Italien und Spanien jeweils ca. 23.000 ha.

### **Techniken zur Pflanzenproduktion in Gewächshäusern**

Abb. 1 zeigt die in Betracht zu ziehenden Techniken eines Gewächshaussystems am Beispiel des Gesamtenergiekonzeptes, zu dem die Bereitstellung der Heizenergie und die den Heizenergieverbrauch im Gewächshaus beeinflussenden technischen Systemkomponenten gehören.

Folgende Fragestellungen sind durch Forschung, Entwicklung und Planung zu beantworten:

---

\* Kurzfassung eines Vortrags vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

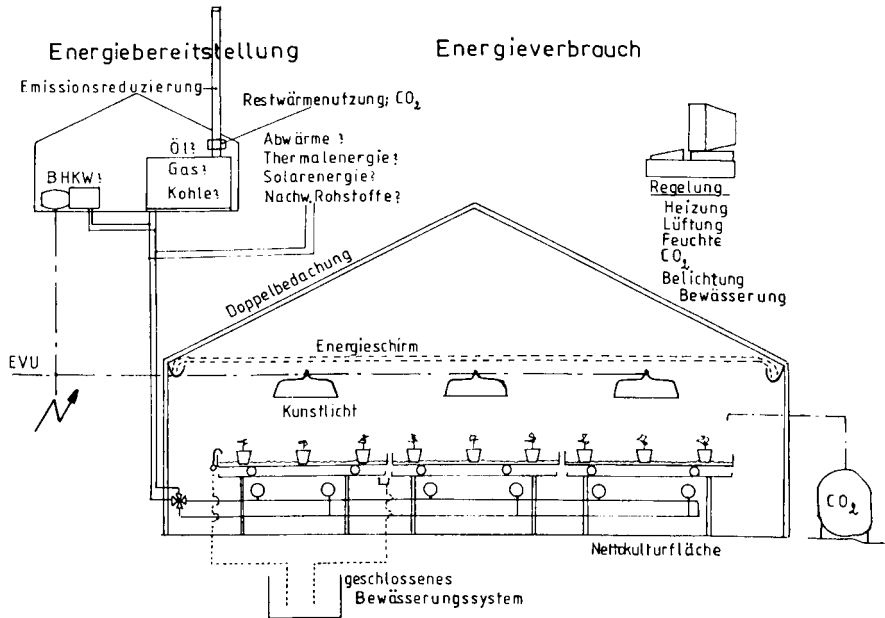


Abb. 1: Gesamtenergiekonzept und technische Einrichtungen einer Gewächshausanlage

1. Energiesparende Maßnahmen an der Gewächshauskonstruktion mit Reduzierung der Wärmebrücken, mit Doppelbedachung, die aber den Lichteinfall vermindert und mit Energieschirmen, die nur in der Nacht zur Wärmedämmung geschlossen werden (2; 3; 4; 5).
2. Tischflächen mit hoher Nettokulturfläche durch Einsatz von Rolltischen oder Palettensystemen (5).
3. Geschlossene Bewässerungsverfahren mit Düngung ohne Eintrag von Düngerlösung in den Boden und mit reduzierter Wasserverdunstung.
4. CO<sub>2</sub>-Düngung mit technischem CO<sub>2</sub> oder Abgasen aus der Gasheizung (6).
5. Künstliche Belichtung mit Bereitstellung der elektrischen Energie vom EVU oder durch Eigenstromerzeugung mit Blockheizkraftwerk (BHKW). Optimierte Einsatzstrategien (6; 7).
6. Optimierte Anordnung und Auslegung von Heizungssystemen im Gewächshaus für gleichmäßige Temperaturverteilung und Minimierung des Energieverbrauchs (8; 9).
7. Auswahl der Heizenergiequellen und Berechnung für den Heizenergieverbrauch (10; 11). Regenerative Energiequellen, Abwärme aus Industrieprozessen, Thermalenergie, Solarenergie, nachwachsende Rohstoffe (5; 12; 13; 14; 15; 16).
8. Regelung der Klimafaktoren und spezielle Regelstrategien zur Optimierung des Ertrages, zur Minimierung der Heizenergie und zur Reduzierung des Einsatzes chemischer Pflanzenschutzmittel (18; 19; 20).

Die Grundfunktion von Gewächshäusern besteht darin, für die Pflanzen ganzjährig optimale Wachstumsbedingungen zu schaffen. Wachstumsfaktoren, die durch Klimatisierungsmaßnahmen beeinflusst werden, sind die Einstrahlung bzw. die Globalstrahlung mit den Anteilen der ultravioletten, der sichtbaren und der unsichtbaren Infrarotstrahlung, die Luft-, Pflanzen- und Bodentemperatur, die Luftfeuchte und die Luftzusammensetzung ( $\text{CO}_2$ -Konzentration). Dazu kommen heute Klimatisierungsmaßnahmen aus ökologischen Gründen.

Für die Gewächshausklimatisierung bedeutet dies:

- Ein Maximum an Lichteinfall bei einem Minimum an Energieverbrauch
- Vermeidung von Emissionen in Wasser, Boden, Luft und Pflanzen
- Verringerung des Einsatzes chemischer Mittel durch Klimaregelstrategien.

### „Gewächshauseffekt“

Bei Sonneneinstrahlung erhöht sich die Temperatur im Gewächshaus erheblich, wenn die Überschusswärmeenergie nicht durch Lüftung oder Kühlung abgeführt wird. Häufig wird dieser Effekt der Temperaturerhöhung allein der nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz auftretenden Strahlenfalle im Glasgewächshaus zugeschrieben, wobei Glas undurchlässig für die langwellige Rückstrahlung ist. Dies ist nicht der Fall, sondern für die Temperaturerhöhung im Gewächshaus ist maßgeblich die behinderte Konvektion verantwortlich, wie aus Abb. 2 zu ersehen ist, in der die Verhältnisse in einem Glas- und einem Foliengewächshaus sowie vergleichsweise im Freiland dargestellt sind. In beide

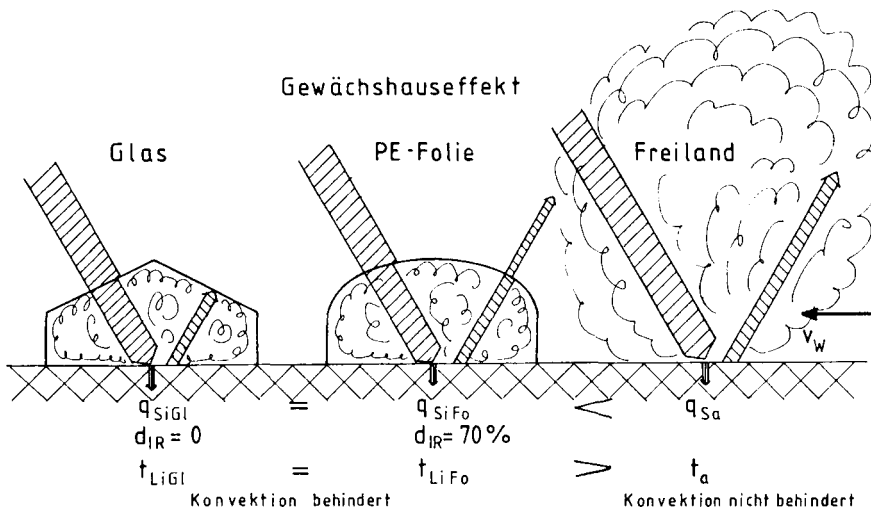


Abb. 2: Die Temperaturerhöhung im Gewächshaus

Häuser kommt etwa der gleiche Anteil an Globalstrahlung  $q_{si}$ , der aber kleiner ist als die Einstrahlung im Freiland  $q_{sa}$ . Die Durchlässigkeit von Glas für langwellige Wärmestrahlung  $d_{IR}$  ist 0, die Durchlässigkeit von trockener PE-Folie aber ca. 60 bis 70%.

Wenn die sogenannte Strahlenfalle allein ausschlaggebend für die Erwärmung im Gewächshaus wäre, müßte die Temperatur im Glasgewächshaus am Tag wesentlich höher ansteigen als im PE-Foliengewächshaus. Dies ist unter Praxisbedingungen nicht nachweisbar. Die Temperaturen unter Glas und Folie nehmen bei Sonneneinstrahlung gleichermaßen stark erhöhte Werte ein, d.h. es ist  $t_{Li(Gl)} = t_{Li(Fo)}$ .

Durch die Absorption der Globalstrahlung an Pflanzen, Einrichtungen und Erdboden werden diese erwärmt. Ein Teil der Wärme wird langwellig abgestrahlt, ein anderer Teil wird durch vorbeiströmende Luft (Konvektion) abgeführt. Diese konvektiv abgeführte Wärme kann sich im Freiland über weite Räume verteilen. Im Gewächshaus mit geschlossener Lüftung dagegen ist die Ausbreitung behindert. Der Luftraum ist beschränkt und die Luft in diesem relativ kleinen Raum erwärmt sich stärker. Dies ist die wesentliche Ursache für die Temperaturerhöhung im Gewächshaus, den sogenannten Gewächshauseffekt. Die Strahlenfalle spielt nur eine untergeordnete Rolle. Deshalb ist der „Gewächshauseffekt“ im Gewächshaus kaum vergleichbar mit dem Treibhauseffekt in der Atmosphäre.

## Klimatisierungsmaßnahmen und Klimaregelung

Seit 1970 sind durch technische und kulturtechnische Maßnahmen Energieeinsparungen bei der Pflanzenproduktion in Gewächshäusern bis zu einer Höhe von 50% möglich geworden (Bezug 1970). Im ITG-Hannover ist ein Expertensystem HORTEx entwickelt worden, mit dem Energieerzeugungsanlagen und Heizungssysteme für Gewächshäuser ausgelegt und Energieverbrauchswerte berechnet werden können (10). Dieses Programm ist in der Praxis eingeführt.

Zur Zeit wird ein Optimierungsmodell für den optimalen Energieeinsatz im Gewächshaus entwickelt. Die Zielsetzung und der Umfang des Optimierungsprogramms sind in Abb. 3 schematisch dargestellt. Im Gewächshaus besteht Wärmebedarf für die Heizung, Strombedarf für die Pflanzenbelichtung und  $CO_2$ -Bedarf für die Assimilation. In den Versorgungseinrichtungen muß elektrische und thermische Energie sowie gegebenenfalls  $CO_2$  aus der Verbrennung von Gas zur Verfügung gestellt werden (s. Abb. 1). Mit bestimmten Klimaregelstrategien, die ebenfalls Bestandteil der Optimierung sind, wird das Klima im Gewächshaus geregelt. Die Zielsetzung des Optimierungsprogrammes ist die Auslegung von integrierten Energieversorgungsanlagen, die Optimierung der Einsatzplanung der Versorgungsanlagen, die Ableitung von optimierten Klimastrategien und die Auswahl der Klimaregelstrategien. Es ist wichtig, die Komponenten der Versorgungseinrichtungen so auszuwählen und aufeinander abzustimmen, daß ein ökonomischer und ökologischer Betrieb gewährleistet wird.

Das Gewächshausklima bietet prinzipiell gute Bedingungen für die Ausbreitung pilzlicher Schaderreger durch die hohen Temperaturen, die höhere Luftfeuchte, die mögli-



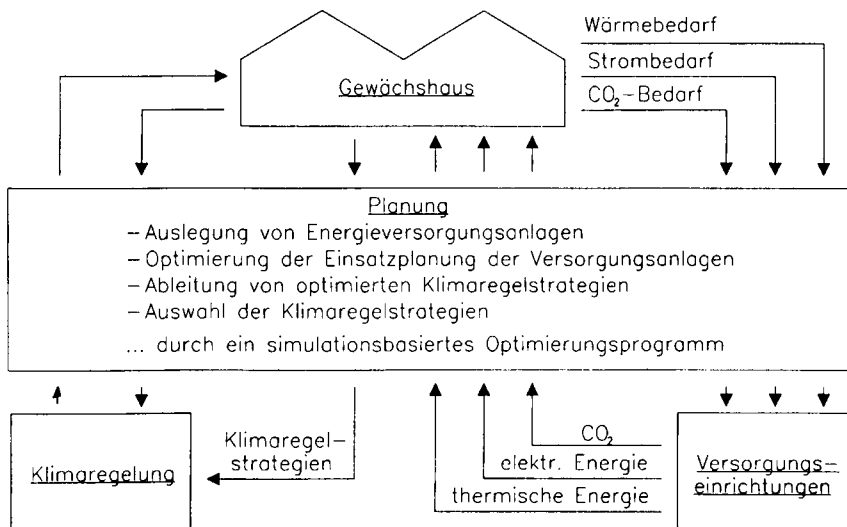


Abb. 3: Optimierungsprogramm für den Energieeinsatz und die Klimatisierung in Gewächshäusern

che Wasserkondensation auf den Pflanzen bei Taupunktunterschreitung und die relative Windstille. Es werden nun verstärkt Untersuchungen angestellt, um den Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln durch geeignete Maßnahmen der Klimatisierung zu reduzieren. Dazu gehören die Anwendung bestimmter Strahlungsdurchlässigkeiten des Bedachungsmaterials (22) und spezielle Klimaregelstrategien (21).

Um das Streckungswachstum bei bestimmten Topfpflanzen zu reduzieren (kompakte Pflanzen), werden chemische Streckungsmittel eingesetzt. Das Streckenwachstum kann aber auch gehemmt werden, wenn Wellenlängen über 690 nm herausgefiltert werden. Eine Mischung von hellrotem und rotem Licht hat andererseits Einfluß auf die Blütenbildung.

Ultraviolette Strahlung im Bereich von 300 bis 350 nm begünstigt die Sporulation von pilzlichen Schaderregern. Die Entstehung von Pflanzenkrankheiten kann in Verbindung mit anderen Klimatisierungsmaßnahmen eventuell verringert werden, wenn diese Wellenlängen herausgefiltert werden. Dies wird untersucht (22). Die spektrale Durchlässigkeit von Kunststoffen als Gewächshausbedachungsmaterial läßt sich durch Additive beeinflussen.

Nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz liegt die maximale Wellenlänge der Rückstrahlung von langwelliger Wärmestrahlung aus dem Gewächshaus bei ca. 9.000 nm. Wenn das Bedachungsmaterial diese langwellige Wärmestrahlung durchläßt, was bei einigen Folien der Fall ist, kann es zur sogenannten Inversion kommen. Die Pflanzen stehen im direkten Strahlungsaustausch mit der kalten Atmosphäre und nicht mit dem wärmeren Dach. Die Pflanzentemperatur sinkt stärker ab und nimmt Werte unter der Um-

gebungslufttemperatur an. Dadurch sinkt auch die Lufttemperatur und kann in ungeheizten Gewächshäusern unter Außentemperatur absinken. Es können im Gewächshaus Frostschäden auftreten, was in ariden und subtropischen Gebieten auch passiert. Sinkt die Pflanzentemperatur, so leidet die Vitalität der Pflanzen. Wenn die Taupunkttemperatur unterschritten wird, tritt Kondensation an den Pflanzen auf, die den Krankheitsbefall begünstigt. Bedachungsmaterialien sollten daher undurchlässig für langwellige IR-Strahlung im Bereich von 4.000 bis 16.000 nm sein.

Mit Hilfe von Klimacomputern ist es heute möglich, alle Klimafaktoren nach verschiedenen Klimaregelstrategien zu regeln. Die Temperatur in Abhängigkeit von der Tageszeit und vom Lichtangebot ist einer der wichtigsten Einflußparameter auf Pflanzenreaktionen. Dabei haben die Tag- und Nachttemperaturwerte unterschiedliche physiologische Wirkungen. Beispielsweise wird das Streckungswachstum durch Absinken der Tagtemperatur verringert. Der Einsatz von chemischen Hemmstoffen kann verringert werden. Andere Pflanzenreaktionen sind im wesentlichen von der Tagesmitteltemperatur abhängig, wobei Tag- und Nachttemperatur in bestimmten Bereichen differieren können. Besonderen Einfluß auf das Streckungswachstum hat man durch starke Absenkung der Temperatur am frühen Morgen erreicht. Entsprechend muß bei vorgegebener Tagesmitteltemperatur die Nachttemperatur angehoben werden.

Es werden unterschiedliche Klimaregelstrategien für verschiedene Produktionsziele entwickelt und eingesetzt, beispielsweise um pflanzenbauliche Reaktionen zu erzielen, um Energieeinsparungen zu erreichen und um die Anfälligkeit der Pflanzen gegen Pflanzenkrankheiten zu mindern. So ist es gelungen, allein durch bestimmte Klimaführung im Pflanzenbestand die Infektion von Topfpflanzen mit *Botrytis* erheblich zu senken (21).

## Literatur

- [1] von Zabeltitz, Chr.: Gewächshäuser. Ulmer-Verlag Stuttgart, 2. Auflage 1986.
- [2] Tantau, H.J.: Der Einfluß von Einfach- und Doppelbedachungen auf das Klima und den Wärmehaushalt von Gewächshäusern. Gartenbautechnische Information, Heft 4 (1985), ITG Hannover.
- [3] Meyer, J.: Bewertung von beweglichen Energieschirmen im Hinblick auf den Energieverbrauch. Gartenbautechnische Information, Heft 11 (1982), ITG Hannover.
- [4] Müller, G.: Energieschirme unter Praxisbedingungen – Bewertung und Optimierung im Hinblick auf Energieverbrauch und Klimaführung. Gartenbautechnische Information, Heft 28 (1987), ITG Hannover.
- [5] von Zabeltitz, Chr. (Hrsg.): Energieeinsparung und alternative Energiequellen im Gartenbau. Ulmer-Verlag, Stuttgart 1982.
- [6] Husmann, H.J.: Optimierung des Energieeinsatzes im Gartenbau. Entwicklung des Optimierungsmodells HORTOS. Laufendes Forschungsvorhaben am ITG Hannover.
- [7] Meyer, J.: Analyse von Kunstlichtsystemen mit einem modularen Simulationsprogramm zur Datengewinnung. Gartenbautechnische Information, Heft 33 (1989), ITG Hannover.
- [8] Tantau, H.J.: Heizungsanlagen im Gartenbau. Ulmer-Verlag, Stuttgart 1983.
- [9] Tantau, H.J.: Heizungssysteme im Gewächshaus. Gartenbautechnische Information, Heft 1 (1982), ITG Hannover.
- [10] Rath, Th.: Einsatz wissensbasierter Systeme zur Modellierung und Darstellung von gartenbautechnischem Fachwissen am Beispiel des hybriden Expertensystems HORTEX, Gartenbautechnische Information, Heft 34 (1992), ITG Hannover.

- [11] *Rath, Th.*: Einfluß der Wärmespeicherung auf die Berechnung des Heizenergiebedarfes von Gewächshäusern mit Hilfe des k'Modelles. Gartenbauwissenschaft 59 (1994) Nr. 1, S. 39–44.
- [12] *von Elsner, B. und H. Bredenbeck*: Nutzung von Abwärme zur Beheizung von Gewächshäusern. Gartenbautechnische Information, Heft 23 (1985), ITG Hannover.
- [13] *Schockert, K.*: Erprobung und Bewertung von Niedertemperatur-Heizsystemen zur Gewächshausbeheizung. Gartenbautechnische Information, Heft 21 (1984), ITG Hannover.
- [14] *von Zabeltitz, Chr.* (Editor): Energy Conservation and Renewable Energies for Greenhouse Heating, REUR Technical Series 3. FAO Rome 1988.
- [15] *Damrath, J.*: Solarenergienutzung im Gewächshaus. Gartenbautechnische Information Teil I, Heft 14 (1982). Teil II: Heft 15 (1983), ITG Hannover.
- [16] *Bredenbeck, H.*: Untersuchung angepaßter Systeme für die solare Gewächshausbeheizung. Gartenbautechnische Information, Heft 36 (1992), ITG Hannover.
- [17] *Thomas, J.*: Untersuchungen zur Optimierung und Eignung wassergefüllter Folienschläuche als passives Kollektor- und Speicherelement im Gewächshaus. Gartenbautechnische Information, Heft 38 (1994), ITG Hannover.
- [18] *Tantau, H.J.*: Analyse des Regelverhaltens klimatisierter Gewächshäuser als Grundlage zur Auswahl und Entwicklung geeigneter Regler. Gartenbautechnische Information, Heft 7 (1979), ITG Hannover.
- [19] *von Elsner, B.*: Das Kleinklima und der Wärmeverbrauch von geschlossenen Gewächshäusern. – Ein Simulationsmodell zur gartenbautechnischen Bewertung unter Berücksichtigung des Einflusses von Standortklima, Pflanzenbestand und Gewächshauskonstruktion. Gartenbautechnische Information, Heft 12 (1982), ITG Hannover.
- [20] *Rüther, M.*: Energieeinsparung durch Wärmerückgewinnung beim Zwangsluftwechsel in abgedichteten Gewächshäusern. Gartenbautechnische Information, Heft 31 (1989), ITG Hannover.
- [21] *Lange, D.*: Entwicklung und Erprobung einer Klimaführungsstrategie für Gewächskulturen zur integrierten Bekämpfung des Grauschimmels. Laufendes Forschungsvorhaben am ITG Hannover.
- [22] *Hoffmann, S.*: Der Einfluß verschiedener Spektren der Globalstrahlung und der IR-Strahlung auf Qualität und Gesundheit von Zierpflanzen. Neues Forschungsvorhaben am ITG Hannover.



KURT LESCHONSKI, Clausthal-Zellerfeld

## **Die Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH – CUTEC-Institut –**

Clausthal-Zellerfeld, 8. Juli 1995\*

### **Aufgaben**

Auf Antrag von fünf Clausthaler Hochschullehrern wurde am 28.3.1990 die Clausthaler Umwelttechnik GmbH als 100 %ige Tochter des Landes Niedersachsen unter Federführung des Ministeriums für Wirtschaft, Technologie und Verkehr durch den Vertreter des Gesellschafters, das Finanzministerium, gegründet. Nach dem Wechsel in der Landesregierung wurde das Ministerium für Wissenschaft und Kultur für das Institut zuständig.

Der Zweck der Gesellschaft ist die anwendungsnahe, wissenschaftliche Forschung auf dem gesamten Gebiet der Umwelttechnik.

Reststoffe oder Abfälle, die nicht entstehen, müssen nicht entsorgt werden. Entstehen sie in geringerem Umfang als bisher, so verringert sich das zu entsorgende Abfallvolumen. Dem *Vermeiden* und *Vermindern* von Abfällen kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu.

Beispiele dafür sind der prozeßintegrierte Umweltschutz durch weitgehend geschlossene Stoffkreisläufe, die firmeninterne Entsorgung von Reststoffen, die Rücknahme von eigenen Produkten aus dem Konsumbereich und die Reduzierung des Verpackungsanteils.

Reststoff oder Abfälle sind im allgemeinen nicht sortenrein, sondern sie bestehen aus einer Mischung unterschiedlicher Stoffe. Viele Einzelkomponenten eines Reststoff- oder Abfallgemisches sind zu wertvoll, um weggeworfen, d. h. deponiert zu werden. Sie sollten deshalb aus dem Reststoff- oder Abfallgemisch aussortiert und die möglichst sortenreinen Komponenten einer erneuten *Verwertung* zugeführt werden. Der danach verbleibende Abfall kann chemisch oder biologisch behandelt oder sicher deponiert werden.

Die anwendungsnahe Forschung der CUTEC-Institut GmbH auf dem Gebiet der Umwelttechnik hat zum Ziel, geeignete Lösungsansätze für die genannten Aufgaben zu erarbeiten bzw. zu erproben.

Beim prozeß- oder produktintegrierten Umweltschutz sind, z. B., die Prozesse der Stoff- und Energieumwandlung so zu optimieren, daß bei einem Endprodukt mindestens gleicher Qualität möglichst wenig oder keine Schadstoffe entstehen oder an nachge-

---

\* Kurzfassung eines auf der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehaltenen Vortrags.

schaltete Entsorgungseinrichtungen abgegeben werden. Die Forschung konzentriert sich auf eine Veränderung der physikalischen, chemischen und biologischen Grundprozesse, um auf neuen, schadstoffärmeren, aber möglichst nicht weniger wirtschaftlichen Wegen, zum gewünschten Endprodukt zu gelangen. Lassen sich trotzdem Schadstoffe im molekular- und grobdispersen Bereich der Partikelgrößen nicht vermeiden, so müssen diese möglichst quantitativ aus dem Trägermedium abgeschieden werden.

Treten andererseits bei einem Produktionsprozeß Abfälle bzw. Reststoffe auf, so sollten die in ihnen enthaltenen Wertstoffe zurückgewonnen werden. Da der wirtschaftliche Wert des zurückgewonnenen Stoffes unter anderem auch vom Gehalt und der Art eventueller Restverunreinigungen abhängt, konzentriert sich die Forschung nicht nur auf die Entwicklung geeigneter Sortierverfahren, sondern auch auf deren Optimierung, vor allem im Hinblick auf die Reduzierung des Gehaltes an Restverunreinigungen.

Stoffe und Stoffgemische, die sich gegenwärtig nicht wirtschaftlich verwerten lassen, sind Abfälle, die ohne Schädigung der Umwelt an einem sicheren Ort abgelagert werden müssen. Eines der verfahrenstechnischen Hauptprobleme besteht dabei in einer Vorbehandlung oder Konditionierung der Abfälle, um eine die Umwelt nicht mehr belastende über- oder untertägige, sichere Ablagerung zu gewährleisten. Bei der geowissenschaftlichen sicheren Deponieanlage ist darüber hinaus aber auch z. B. die Durchlässigkeit von Böden oder von Kavernenwänden für noch vorhandene Schadstoffreste von großer Bedeutung.

Da Schadstoffemissionen nur erkennbar sind, wenn sie durch eine geeignete Analytik nachgewiesen wurden, bildet die Anwendung sowie die Weiter- und Neuentwicklung von Schadstoff-Meßgeräten, insbesondere für die On-line-Überwachung, ein weiteres wichtiges Arbeitsgebiet Clausthaler Umwelttechnikforschung.

Diesen und weiteren Aufgaben, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben sind, widmet sich das Clausthaler Umweltinstitut in insgesamt acht Abteilungen, die von Hochschullehrern der Technischen Universität Clausthal wissenschaftlich betreut und von in der Regel promovierten Abteilungsleitern, die CUTEC-Institut-Angestellte sind, geleitet werden.

## **Struktur und Arbeitsgebiete**

Durch die Gründung des Instituts soll die bisherige, clausthalspezifische, umweltrelevante Forschung vor allem anwendungsbezogen, d. h. ingenieurmäßig und interdisziplinär erweitert und die physikalischen, chemischen und biologischen Grundlagen für ihre technische Anwendung bei der Lösung von Umweltprodukten bereitgestellt bzw. erarbeitet werden.

Die CUTEC-Institut GmbH besitzt eine nicht alltägliche Leitungsstruktur. Der Geschäftsführer und die wiss. Berater der acht Institutsabteilungen sind Hochschullehrer der Technischen Universität Clausthal. Sie üben ihre wissenschaftliche Tätigkeit, die sich vor allem in einer Ausweitung ihrer bisherigen Forschungsarbeiten äußert, im CUTEC-Institut im Nebenamt auf Verlangen des Dienstvorgesetzten aus. Damit soll ver-

deutlich werden, daß die GmbH ihre Wurzeln in der Technischen Universität Clausthal hat und aus der Kooperation mit dieser ihre Stärken erwachsen.

Die Hochschullehrer bilden das wissenschaftliche Leitungsgremium des Instituts. Der Vorsitzende dieses Gremiums ist zugleich Geschäftsführer der GmbH. Der Rückgriff auf die fachliche Kompetenz der Hochschullehrer der TU Clausthal liegt nahe, da eine Hochschule, die sich seit ihrer Gründung im Jahre 1775 mit der Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen dieser Erde auseinandergesetzt hat, seit dieser Zeit auch Probleme behandelt, die man heute unter dem Begriff „Umwelttechnik“ zusammenfaßt. Durch einen Kooperationsvertrag mit der Technischen Universität Clausthal sowie durch die Einbindung der Hochschullehrer in die Beratungsstruktur des CUTEC-Instituts ist sichergestellt, daß jetzt und auch in Zukunft eine gemeinsame, interdisziplinäre Bearbeitung umweltrelevanter Probleme erfolgen kann.

*Die acht Abteilungen der CUTEC-Institut GmbH widmen sich folgenden Aufgaben:*

Die Abteilung für *Prozeß- und Umweltanalytik* beschäftigt sich mit der Durchführung von physikalisch-chemischer Analytik an molekulardispersen und grobdispersen Schadstoffen in Gasen und Flüssigkeiten sowie in Böden im Rahmen der Forschungsarbeiten der GmbH. Darüber hinaus wird die Entwicklung problemorientierter neuer und die Weiterentwicklung bestehender Analysenverfahren, insbesondere für die prozeßbegleitende Messung von Schadstoffen, betrieben.

Eine Hauptaufgabe der Abteilung für die *Verfahrenstechnik der physikalischen und chemischen Reststoffverwertung und dem Recycling von Wertstoffen* ist die Sortierung von Abfall- und Sekundärrohstoff-Gemischen mit dem Ziel, wirtschaftlich nutzbare Wertstoffkomponenten weitgehend frei von Restverunreinigungen vom Abfall zu trennen und einer Wiederverwertung zuzuführen. Beispiele sind die Aufbereitung und Verwertung von Sekundärstoffen, von Abfällen der Energieumwandlung, von Sekundärrohstoffen aus bergmännischen Halden, von Elektronikschrott usw. Darüber hinaus werden, im Bereich *umweltgerechte Demontage*, die Entwicklung produktspezifischer Demontage-logistiken, z. B. im Bereich der Automobildemontage sowie die recyclinggerechte Bauteilgestaltung, Werkstoffauswahl und Zerlegungsstrategien, bearbeitet. Ein Schulungszentrum mit Pilotdemontagestudio ist im Aufbau.

Die Abteilung für die *Verfahrenstechnik der thermischen Behandlung von Reststoffen und der Verminderung des Energieeinsatzes* befaßt sich mit der Verfahrensentwicklung und -optimierung der thermischen Behandlung von schadstoffbelasteten gasförmigen, flüssigen und festen Reststoffen, mit dem Ziel, komplexe, gefährliche Verbindungen zu einfachen, in ihren Auswirkungen überschaubaren chemischen Substanzen umzusetzen. Dabei sollen durch geeignete prozeßtechnische Maßnahmen eine minimale Emission von gasförmigen Schadstoffen und Stäuben sowie deponierbare feste Rückstände erzielt werden. Im Bereich der Energieminimierung steht die unmittelbare Reduzierung des Primärenergieeinsatzes bei thermischen Prozessen im Vordergrund.

In der Abteilung für die *Verfahrenstechnik der physikalischen, chemischen und biologischen Verminderung von Schadstoffen in Flüssigkeiten sowie in Gasen*, d. h. dem Be-

reich der Wasser- und Luftreinhaltung, wird die Entwicklung und Untersuchung von anwendungsbezogenen Verfahren zur Aufarbeitung flüssiger, schadstoffbelasteter Gemische, wie Lösungsmittelgemische, toxische Lösungen usw. sowie von komplexen Abwässern, wie Industrieabwässern, behandelt. Darüber hinaus wird die Weiterentwicklung und Untersuchung mechanischer Verfahren zur fest-flüssig-Trennung bearbeitet.

Im Bereich der Luftreinhaltung stehen Untersuchungen zur Verminderung und Vermeidung von molekular- und grobdispersen Emissionen in Luft- bzw. anderen Prozeßgasen im Rahmen der Weiterentwicklung bestehender und der Entwicklung neuer Abscheideverfahren im Vordergrund. Darüber hinaus wird die Entwicklung und Erprobung prozeßrelevanter On-line-Probennahme und On-line-Partikelmeßtechnik betrieben.

Die Abteilung *Sicherheitstechnik und Reaktionsführung bei chemischen Prozessen* befaßt sich mit der Erstellung, Bewertung und Begutachtung von Sicherheitsanalysen für chemische Fabrikationsanlagen, der Ermittlung sicherheitstechnisch relevanter Stoffdaten, der Analyse und Bewertung von Stör- und Unfällen in chemischen Fabrikationsanlagen, der Entwicklung und Prüfung von Katalysatoren zur Verminderung der Bildung von Schadstoffen sowie der Entwicklung umweltfreundlicher Alternativverfahren für die Synthese chemischer Produkte.

Die Abteilung für die *Verfahrenstechnik der Behandlung von Abfällen für die sichere Lagerung sowie die bergmännische und geowissenschaftliche Sicherung von Deponien* behandelt die Entwicklung und Erprobung von standortbezogenen Qualitätsanforderungen an Abfalldeponate sowie der Verfahrenstechnik der Behandlung, d. h. Konditionierung von Abfällen für die sichere Deponie. Außerdem bilden Untersuchungen der Standortsicherheit und Funktionsfähigkeit von Deponien zur über- und untertägigen Zwischen- und Endablagerung von Abfällen sowie die Gefährdungsabschätzung von Deponien und Altlasten Themenbereiche der aktuellen Forschung.

Die Abteilung für *Umweltrecht und Umweltökonomie* berät die vorstehend genannten Institutsabteilungen in Fragen der einschlägigen umweltrelevanten Gesetzgebung. Sie überprüft die Wirtschaftlichkeit von in den Abteilungen erarbeiteten Vorschlägen zu umweltrelevanten Problemlösungen. Darüber hinaus behandelt die Abteilung Fragen der betrieblichen Umweltökonomie unter besonderer Beachtung der betrieblichen Entsorgungswirtschaft.

Die Abteilung für *Technikbewertung und Umweltbildung* nimmt die Aufgaben der Öffentlichkeitsarbeit und die Vorbereitung und Durchführung von Fortbildungsveranstaltungen und Ausstellungen wahr. An die Teilnehmer derartiger Veranstaltungen sollen anwendungsnahe und praxisbezogene Informationen, die auf bekannten und erprobten Verfahren und Techniken beruhen, weitergegeben werden. Darüber hinaus soll das Verständnis der komplexen und vernetzten Probleme im Umweltbereich interdisziplinär behandelt und diskutiert werden. In Zusammenarbeit mit dem „Forum Clausthal“ soll Vertretern aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft eine Plattform für Gespräche und Diskussionen mit dem Ziel gegeben werden, über eine verantwortbare, konsensfähige Zukunft nachzudenken und Programme zu entwerfen. Das Gebiet der Technikfolgenabschätzung wird durch Bearbeitung von Projekten in den Bereichen Technikbewertung und Ökobilanzen bearbeitet.



Das Institut überstreicht mit den dargestellten Forschungs- und Arbeitsgebieten nahezu den gesamten Bereich der Umwelttechnik. Dabei widmet sich das CUTEC-Institut vor allem den anwendungsnahen, interdisziplinären Problemkreisen und bearbeitet diese zusammen mit anderen Institutionen, d. h. der Industrie, den Kommunen und Behörden und anderen Forschungsinstituten.

Das CUTEC-Institut ist ein Forschungsinstitut. Es wird derzeit Problemlösungen nicht selbst vermarkten. Diese Aufgabe soll zusammen mit anderen Industriepartnern, die die Produktion und den Verkauf übernehmen können, abgewickelt werden. Das CUTEC-Institut versteht sich vor allem als ein Forschungsinstitut für die mittelständische Industrie, d. h. für Firmen, die sich aufgrund ihrer Größe keine eigene qualifizierte Forschungsabteilung leisten können. Es strebt auch Kooperationen mit dem Ausland an.

Seit Beginn des Jahres 1995 sind die genannten Abteilungen des CUTEC-Instituts in einen Neubau umgezogen, der den Mitarbeitern ideale Arbeitsplätze bietet. Der Neubau weist eine Hauptnutzfläche von ca. 4.300 m<sup>2</sup> auf. Für den Bau des Instituts wurde eine bis dahin zum Grundbesitz der TU Clausthal gehörende, 20.000 m<sup>2</sup> große Bergwiese am östlichen Ende der Leibnizstraße vom Institut gekauft. Die Wiese ist den verfahrenstechnischen Instituten direkt benachbart und schließt das Hochschulgelände im Feldgraben nach Osten ab.

Die Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH, das CUTEC-Institut, ist ein Forschungsinstitut. Es strebt bei der Lösung umweltrelevanter Fragestellungen die Kooperation vor allem mit der mittelständischen Industrie an, die die Vermarktung erarbeiteter Lösungen übernehmen sollte. Das CUTEC-Institut wird deshalb zumindest vorerst keine Produktion auf- oder übernehmen, sondern allenfalls in der Weiterverfolgung erarbeiteter Problemlösungen als Ingenieurbüro tätig werden.

Die Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH hofft, durch ihre derzeitige und zukünftige Tätigkeit einen substantiellen Beitrag zur Lösung umweltrelevanter Probleme leisten zu können.



ERWIN STEIN, Hannover · FRANZ -JOSEPH BARTHOLD, Hannover

## Optimierungsprobleme in der Mechanik

Braunschweig, 13. Oktober 1995\*

### 1. Entwicklung der Optimierung in der Mechanik, der Mathematik und in den technischen Anwendungen

Im Prozeß der Evolution von Natur und Menschheit sind viele Weiterentwicklungen erkennbar, die als zielgerichtet und damit als optimal verstanden werden können.

Auch die Mathematik und die Mechanik sind durch Optimierungsprobleme wesentlich in ihrer Entwicklung vorangetrieben worden, wobei hinter einigen berühmten Fragestellungen sowohl der Spieltrieb des Geistes als auch praktische – später technische – Interessen standen.

Die ersten bekannten Anregungen zur Behandlung von Optimierungsaufgaben findet man in der römischen Mythologie in Gestalt der Königin Dido, die nach der optimalen Form eines Seils von gegebener Länge  $L$  fragte, damit dieses Seil eine Fläche mit möglichst großem Inhalt umschließt, nämlich eine möglichst große Grundstücksfläche als ihr Eigentum. Dem Griechen Archimedes (285–112 v. Chr.) gelang als erstem eine Näherungslösung der in unserem heutigen Sprachgebrauch als ‚isoperimetrisches Variationsproblem‘ bezeichneten Optimierungsaufgabe. Dabei umfaßt der Halbkreisbogen mit der Länge  $L$  den größtmöglichen Flächeninhalt  $A = L^2/2\pi$ .

In der geschichtlichen Entwicklung führten diese und ähnliche Aufgabenstellungen zu einer stetigen Weiterentwicklung der mathematischen Hilfsmittel, die als ersten Höhepunkt in der Entwicklung der Infinitesimal- und Integralrechnung durch I. Newton (1642–1727) und G. W. Leibniz (1646–1716) gipfelte. Damit waren die grundlegenden Voraussetzungen zur Entwicklung der Variationsrechnung durch L. Euler (1707–1783) und J. L. de Lagrange (1736–1813) geschaffen, die sich seitdem mit den modernen funktionalanalytischen Methoden und allgemeiner der Operatoranalysis als die sowohl grundlegende als auch leistungsstarke mathematische Methode zur Behandlung einer Vielzahl von Optimierungsproblemen in der Mechanik erwies.

Am Beginn der eigentlichen Entwicklung der Variationsrechnung am Ende des 17. Jahrhunderts stand das ‚Problem der Brachistochrone‘, d. h. der Frage nach dem im Schwerfeld schnellsten Weg eines Massepunktes zwischen zwei Punkten mit verschiedenen Höhen- und Längenkoordinaten. Dieses berühmte Beispiel zur Lösung von Variationsaufgaben mit Nebenbedingungen (isoperimetrisches Variationsproblem) wurde von Johann Bernoulli im Jahre 1696 in der von Leibniz herausgegebenen Zeitschrift ‚Acta Eruditorum Lipsiae‘ veröffentlicht und initialisierte den Forscherdrang einer Vielzahl

---

\* Zusammenfassung eines Vortrags vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

berühmter mathematischer Gelehrter wie z. B. Newton, Leibniz, Jakob Bernoulli, Huygens, L'Hospital. Neben der Lösung des Brachistochronen-Problems als gewöhnliche Zykloide durch Leibniz im Jahre 1697 wurde die Variationsrechnung dabei soweit entwickelt, daß in den darauffolgenden Jahrzehnten ähnliche mechanische Problemstellungen behandelt werden konnten.

In diesem Kontext entstanden die Arbeiten von Maupertuis (1747) über das ‚Prinzip der kleinsten Wirkung‘ und von C.F.Gauß (1827) über das ‚Prinzip des kleinsten Zwangs‘, in deren Extremalaussagen sowohl mechanische Postulate als auch weltanschauliche Spekulationen wie z. B. das Leibnizsche Postulat ‚dieser Welt als der besten aller denkbaren Welten‘ Eingang finden.

Für die Entwicklung der heutigen Festkörpermechanik erwiesen sich insbesondere das Dirichletsche Prinzip (nach P.G.L. Dirichlet, 1805–1859) und das Hamiltonsche Integralprinzip der Starrkörperkinetik (nach Sir W. Hamilton, 1805–1865) als besonders bedeutend. Bei dem erstgenannten Prinzip wird postuliert, daß die gesamte potentielle Energie im Gleichgewichtszustand einen minimalen Wert annimmt, sofern die mechanischen Spannungen und die äußeren Kräfte aus Potentialen herleitbar sind.

Diese klassischen Variationsprinzipien wurden für vielfältige mechanische Aufgabenstellungen weiterentwickelt und in Form von Variationsungleichungen auf Problemstellungen mit Ungleichungsnebenbedingungen erweitert. Hierbei sei insbesondere auf die in den fünfziger Jahren dieses Jahrhunderts entstandene Kuhn-Tucker-Theorie verwiesen, die in der Plastizitätstheorie oder bei Kontaktproblemen ihre Anwendung findet.

Neben der fortgeschrittenen Entwicklung der theoretischen Grundlagen der Variationsrechnung fehlten jedoch bis zu Beginn der fünfziger Jahre leistungsfähige Berechnungsmethoden zur Behandlung realistischer Ingenieurstrukturen. Der Durchbruch zu den heutigen effizienten direkten numerischen Variationsverfahren basiert auf den Arbeiten von W. Ritz (1908), der die sogenannten ‚Ritz-Ansätze‘ in das Extremalprinzip einführte, sowie von B.G.Galerkin (1915), der in der variationellen Form die Orthogonalität der Ansatzfunktionen bezüglich der Residuen der Feldgleichungen als methodisches Prinzip verwendete. Erst mit dem Aufkommen der elektronischen Rechner nach 1950 wurde die Anwendung der auf den Ritzschen und Galerkinschen Ideen basierenden Finite-Elemente-Methode (mit Parameteransätzen in finiten Teilgebieten) zur bisher leistungsfähigsten numerischen Berechnungsmethode für komplexe technische Problemstellungen ermöglicht.

Neben der speziellen Approximation der Variationsformulierung, die zu endlich dimensional, linearen oder nichtlinearen algebraischen Gleichungssystemen, ggfs. unter Berücksichtigung weiterer nichtlinearer Gleichungs- bzw. Ungleichungsnebenbedingungen, führt, sind die hierzu gehörigen Lösungsalgorithmen bestimmend für die effiziente Behandlung der Ingenieuraufgaben.

Mit zunehmender Komplexität sind zunächst die direkten bzw. iterativen Löser für lineare Gleichungssysteme unterschiedlicher Struktur, die Algorithmen zur Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme, wie z. B. das Newton- bzw. die unterschiedlichen Quasi-Newton-Verfahren, zu nennen. Die Behandlung restringierter Probleme ist mit den Algorithmen der mathematischen Optimierung möglich, die jeweils spezielle Eigen-

schaften der Problemformulierung zur effektiven Lösung ausnutzen. Beispielhaft seien genannt: das Penalty-Verfahren zur Überführung der restringierten Probleme in unrestringierte Formulierungen und die zugehörige Lösung mit Newton-Verfahren; das Bertsekas-Verfahren als projiziertes Newtonverfahren für Probleme mit separablen, linearen Ungleichungsnebenbedingungen; die SQP-Verfahren (Sequential Quadratic Programming) als leistungsstarke Algorithmen für allgemeine nichtlineare Probleme mit nichtlinearen Nebenbedingungen ohne spezifische Struktur; und weiterhin die sogenannten ‚dualen Verfahren‘ wie z. B. ‚SCP‘ (Sequential Convex Programming) und ‚MMA‘ (Method of Moving Asymptotes), die die originäre Minimalaufgabe in den primalen Unbekannten in zugehörige (duale) Maximierungsprobleme für die Lagrange-Multiplikatoren verwandeln. Diese Optimierungsalgorithmen benötigen alle die Gradienten der betrachteten Zielfunktion sowie der Nebenbedingungen bezüglich der primalen Unbekannten, die aus der mechanischen Modellbildung der Aufgabe, d. h. der Wahl der Variationsformulierung und der zugehörigen Diskretisierung, hergeleitet werden müssen.

Die Bereitstellung aussagekräftiger Variationsformulierungen, die zugehörige Diskretisierung in Raum und Zeit unter Beachtung ihrer mathematischen Eigenschaften hinsichtlich Konvergenz und Stabilität sowie die effiziente Bereitstellung der erforderlichen Gradienten im Rahmen algorithmisch vollständiger (konsistenter) Linearisierungen bilden heutzutage Schwerpunkte der ‚Computational Mechanics‘.

## 2. Strukturoptimierung

Die Aufgaben des Ingenieurs im Entwicklungsprozeß eines Bauwerks bestehen aus dem ständigen Kreislauf der folgenden Arbeitsschritte:

*konstruieren – berechnen – bewerten (Erfahrung sammeln) – verbessern – lernen.*

Die numerischen Methoden zur Berechnung vielfältiger Ingenieurstrukturen, wie z. B. die Strukturanalyse mittels der Finite-Elemente-Methode, haben inzwischen weite Verbreitung und Akzeptanz gefunden. Demgegenüber sind die algorithmischen Werkzeuge zur Strukturoptimierung, d. h. zur zielgerichteten Unterstützung des Konstruktionsprozesses, noch weitestgehend im Entwicklungsstadium und daher noch nicht in die tägliche Ingenieurtätigkeit integriert.

Der Ausgangspunkt jeder Optimierung, also sowohl einer intuitiven erfahrungsbedingten Verbesserung von Hand als auch einer zielgerichteten, mit dem Computer durchzuführenden, algorithmischen Bearbeitung, erfordert zunächst eine problemgerechte Definition des gewünschten Optimierungsziels, d. h. der Zielfunktion oder mehrerer Teilziele, die Festlegung der einzuhaltenden Nebenbedingungen und die Auswahl geeigneter Designvariablen. Die möglichen Modifikationen einer Struktur bestimmen dabei die Art der betrachteten Strukturoptimierung, d. h. man unterscheidet bei steigender Komplexität die Problemstellungen:

- ‚Querschnittsoptimierung‘, bei der für feste Topologie und Geometrie die Querschnitte der Struktur z. B. die Dicken von Schalenbauwerken bzw. die Querschnittswerte von Stabtragwerken modifiziert werden, d. h. die Designvariablen bilden.

- ‚Gestaltoptimierung‘, bei der die Geometrie der einzelnen Bauteile bei feststehender Topologie optimal verändert wird.
- ‚Topologieoptimierung‘, bei der die topologischen Zusammenhänge der Struktur und ggfs. auch die Werkstoffe verändert werden. Hierbei nimmt man entweder von einer homogenen Materialverteilung Material weg (Bilden von Löchern), oder es wird umgekehrt Material dort plaziert, wo es benötigt wird.

Die Entwicklung der Strukturoptimierung begann mit den Arbeiten von J.C. Maxwell (1869) und A.G.M. Michell (1904) zum Aufbau einer Entwurfstheorie (theory of layout). Hierbei wurde die Anordnung von Stäben zur Gewichtsminimierung der Konstruktion unter Berücksichtigung eines speziellen Lastfalls ermittelt. Die optimale Anordnung der Stäbe folgt den Spannungstrajektorien dieses Lastfalls, jedoch ist die Konstruktion unbrauchbar für andere Lastfälle. Auch ist die Stabilität der Druckstäbe nicht berücksichtigt.

Eine Weiterentwicklung basierte auf den Arbeiten von Shanley (1960), der in der Theorie gleichzeitiger Versagenszustände (simultaneous mode of failure) Optimalität der Konstruktion dann feststellt, wenn alle Systemteile im Versagenszustand maximal zulässig beansprucht werden. Diese Vorgehensweise entspricht der Ingenieurvorstellung – jedoch ohne Redundanz beim Versagen-, wurde jedoch nicht in eine rationale, algorithmische Methodik umgesetzt. Weiterhin konnte an einigen Gegenbeispielen gezeigt werden, daß mit dieser Methode optimale Geometrien nur für statisch bestimmte Fachwerke erzielt werden können.

Eine direkte Auswertung der Extremalprinzipien der Mechanik, d.h. der Kuhn-Tucker-Bedingungen, und die Herleitung zugehöriger Optimalitätsbedingungen wurde Anfang der sechziger Jahre von W. Prager eingeführt. Der wesentliche Vorteil dieser Algorithmen besteht in der Nähe zur mathematischen Variationsformulierung und der sich ergebenden einfachen Strukturen der iterativen Lösung. Die Einsatzmöglichkeiten dieser ‚Optimalitätskriterien-Methode‘ beschränkt sich auf einige ausgewählte Probleme mit einfachen Zielfunktionen und Nebenbedingungen, die in den möglichen Anwendungsfällen schnell und effizient gelöst werden. Als Beispiel seien der Abbau von Spannungskonzentrationen unter der Verwendung des Optimalitätskriteriums ‚Randparallele Spannungstrajektorien‘ genannt.

Die derzeit leistungsfähigsten Algorithmen basieren auf der iterativen Lösung der Kuhn-Tucker-Bedingungen unter Verwendung der Algorithmen der Mathematischen Programmierung. Die Entwicklung dieser Methodik begann Ende der fünfziger Jahre für die gewichtsminimale Konstruktion von Stabwerken unter Berücksichtigung von Spannungsbeschränkungen als lineares Optimierungsproblem. Seitdem wurde eine stetige Entwicklung vollzogen, deren derzeitiger Stand für die Behandlung von Problemen zur Gestalts- und Querschnittsoptimierung im weiteren kurz dargestellt wird.

Die Algorithmen orientieren sich an der obengenannten Tätigkeiten des Ingenieurs im Konstruktionsprozeß und bilden die einzelnen Tätigkeiten innerhalb eines Gesamtalgorithmus ab, wobei insbesondere die folgenden Detailprobleme zu behandeln sind.

- **Konstruieren mittels Computer Aided Design (CAD)**

Die Wahl eines geeigneten Geometriemodells der betrachteten Struktur sowie die Fähigkeit der schnellen Änderung der Konstruktion und sämtlicher hiervon abgeleiteter Ansichtszeichnungen, Detailkonstruktionen etc. ist eine wesentliche Voraussetzung für einen effizienten konstruktiven Entwicklungsprozeß. Diese Fähigkeiten werden in zunehmendem Maße von den kommerziellen CAD-Programmen angeboten. Darüber hinaus bleibt jedoch die geeignete Parametrisierung einer komplexen Struktur mit möglichst wenigen aussagekräftigen Designvariablen eine derzeit noch offene Frage. Ansätze hierzu sind in unserem Institut mit „Hierarchischen Geometriemodellen“ formuliert worden, welche eine adaptive Steuerung des im Optimierungsprozeß betrachteten Geometriemodells sowie die adaptive Auswahl weniger, aussagekräftiger, geometrischer Designvariablen beinhaltet.

- **Strukturberechnung mittels Finite-Elemente-Methode (FEM)**

Die Berechnung komplexer Strukturen mit geometrisch und physikalisch nichtlinearem Verhalten ist inzwischen weit entwickelt. Als besonderen Schwerpunkt künftiger Forschung ist die optimale, fehlerkontrollierte selbstadaptive Generierung geeigneter FE-Diskretisierungen anzusehen, bei denen die erforderliche Genauigkeit der Strukturberechnung in Verbindung mit dem gewählten Geometriemodell sowie dem Fortschritt der Optimierung zu setzen ist.

- **Bewertung der Ergebnisse in der Sensitivitätsanalyse**

Die Sensitivitätsanalyse für beliebiges nichtlineares Strukturverhalten vom elliptischen, parabolischen und hyperbolischen Typs mit und ohne Nebenbedingungen ist derzeit ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt von außerordentlicher Bedeutung für den Gesamtalgorithmus. Die Entwicklung deutet dabei auf eine integrierte Behandlung aller notwendigen Linearisierungen für die Strukturanalyse und die Strukturoptimierung im Rahmen einer modifizierten Elemententwicklung hin. Die ermittelten Sensitivitäten sind darüber hinaus von großer Eigenbedeutung, z. B. für die Beurteilung der Sicherheit von stabilitätsgefährdeten Strukturen gegenüber Imperfektionen.

- **Verbesserung der Lösung durch Einsatz der Mathematischen Optimierung**

Die Algorithmen der mathematischen Optimierung wurden bereits kurz angesprochen. Die Auswahl eines effektiven Algorithmus ist auf die spezielle Struktur der Optimierungsaufgabe abzustimmen, d. h. insbesondere die Beschränkung auf Gleichheitsnebenbedingungen bzw. Schranken für die Unbekannten ermöglichen den Einsatz wirkungsvoller Spezialalgorithmen.

- **Erfahrung sammeln und weitergeben durch wissensbasierte Systeme (Expertensysteme)**

Darüber hinaus ist es von großer Bedeutung, die Informationen der Sensitivitätsanalyse sowie die Erfahrungen in der Behandlung von Optimierungsproblemen in die zukünftige Modellierung der Aufgaben der Strukturoptimierung einfließen zu lassen.

### 3. Weitere neuere Anwendungen von Optimierungsmethoden

Die mathematischen Optimierungsalgorithmen werden in einer Vielzahl anderer Probleme der Strukturmechanik eingesetzt, wobei insbesondere die Themenschwerpunkte ‚Traglast- und verallgemeinerte Einspieltheorie‘ sowie die ‚Parameteridentifikation‘ komplexer nichtlinearer Materialgesetze und dynamischer Systeme von großer Bedeutung sind.

Bei der Einspieltheorie (Shake-Down-Theorie) für Systeme aus elastoplastischen Werkstoffen ist die relevante Lastfallkombination a priori nicht bekannt, vielmehr ist nur ein konvexer Lastraum aller möglichen Lasten vorgegeben. Die Algorithmen behandeln daher das Problem des Versagens einer Struktur als Optimierungsproblem, wobei der größte ‚Durchmesser‘ des Lastraums unter der Bedingung zu finden ist, daß die gesamte plastisch dissipierte Energie stationär wird. Dann nehmen die plastischen Verzerrungen für beliebige Lastzyklen innerhalb des Lastraums nicht mehr zu. Auch hierbei wird für die Strukturanalyse meist die Finite-Elemente-Methode (FEM) aber auch die Randelement-Methode (REM, BEM) eingesetzt.

Bei der Parameteridentifikation von komplizierten Materialgleichungen wird die Problematik der Auswahl geeigneter Materialparameter komplexer Materialmodelle behandelt. Durch die Vorgabe von gemessenen Versuchsdaten, insbesondere auch aus inhomogenen und zyklischen Versuchen, ist der Abgleich der numerischen Rechenergebnisse mit den gemessenen und statistisch gefilterten Versuchsergebnissen durch ein Minimalproblem möglich, dessen Unbekannte die Materialparameter sind.

Es handelt sich hierbei um ein schlecht gestelltes inverses Problem (Hadamard-Problem), für das meist Regularisierungen, z. B. nach Tychonov, erforderlich sind. Die hierfür verwendeten effektiven Algorithmen benötigen die Gradienten der Zielfunktion (gewichtetes Fehlerquadratminimum). Dieses Forschungsgebiet ist von wachsender Bedeutung, denn nur die Identifikation, also der inverse Prozeß, entscheidet, ob die Materialparameter identifizierbar sind oder u. U. als falsifiziert gelten müssen. Von praktischer Bedeutung ist, ob eine gewählte Materialgleichung genügend robust ist, d. h. ob kleine Änderungen der Meßdaten nicht zu großen Änderungen der Materialparameter führen. Auch stochastische Identifikationen aus den rohen Meßdaten unter Einbeziehung der Meßfehler sowie der Geometrie- und Materialimperfectionen werden derzeit erforscht.



#### 4. Ausblick

Für die weitere Entwicklung der Kontinuums- und Strukturmechanik sowie der Strukturoptimierung ergeben sich folgende Schwerpunkte, die sämtlich auf den Einsatz moderner Optimierungsmethoden angewiesen sind.

Betrachten wir zunächst die Materialtheorie, so zeichnen sich die folgenden Entwicklungen ab:

- Verbesserte Stoffgesetze für komplexes Werkstoffverhalten bei zyklischen Deformationen, auch unter Verwendung fraktaler Ableitungen und verschiedener Makrokontinua
- Komposition bzw. Materialsynthese zur Erziehung optimierter Materialeigenschaften
- Beschreibung von Schädigung, Lokalisierung, Phasentransformationen und Werkstoffversagen, d.h. Instabilitäten der Deformation, auch durch Einbeziehung einer oder mehrerer Mesoebenen und Homogenisierungen durch Mittelbildungen oder stochastische Maßtheorien
- Identifikation von makroskopischen Materialparametern

Darüber hinaus sind die folgenden Problemkreise zu nennen:

- Mehrzieloptimierung (Paretooptimierung) unter Beachtung der Stabilität, der Lebensdauer, von Ausnahmelasten, der Gesamtkosten usw.
- Passiv und aktiv geregelte Strukturen in Abhängigkeit der Beanspruchung unter Verwendung von Materialien mit Phasenübergängen
- Lebensdauervorhersagen bei stochastischer Beanspruchung, z. B. für Brücken, Flugzeuge, Schiffe und zugehörige Optimierungen
- Hierarchische Modellierung in der Numerischen Mechanik sowie Integration adaptiver Näherungslösungen mit Modellverbesserungen in Teilgebieten
- Adaptive und hierarchische Methoden in der Strukturoptimierung.

---

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Erwin Stein  
Dr.-Ing. Franz-Joseph Barthold  
Institut für Baumechanik und Numerische Mechanik · Universität Hannover  
Appelstraße 9A · 30167 Hannover



MATTHIAS BOHNET, Braunschweig

## Heißgasentstaubung

Braunschweig, 10. November 1995\*

### Einführung

Die Auslegung von Staubabscheidern für den Betrieb bei hohen Temperaturen und hohen Drücken ist nach wie vor schwierig. Zur Lösung der Probleme sind drei Fragen zu beantworten:

- Verlässliche Berechnung des Fraktionsabscheidegrades für hohe (zirkulierende Wirbelschicht) und niedrige (Gasturbinenbetrieb) Feststoffbeladungen.
- Die Festigkeit und Standzeit der Filtermaterialien sowie die Möglichkeiten der Entfernung abgeschiedener Feststoffpartikel oder Tropfen vom Filtermittel müssen bekannt sein.
- Der Austrag der Asche, beziehungsweise Flüssigasche, aus dem Abscheider ist zu gewährleisten. Für Temperaturen bis 1100 K ist das Problem gelöst, für Temperaturen über 1100 K, bei denen die Asche klebrig oder flüssig wird, sind noch keine Lösungen für einen zuverlässigen Betrieb von Abscheidern bekannt.

Die Entwicklung neuer Prozesse und verschärfte Umweltforderungen erfordern deshalb neue Überlegungen zur Heißgasentstaubung. Die wichtigste technische Anwendung in diesem Bereich liegt bei fortschrittlichen kohlegefeuerten Kraftwerken. Für den konventionellen Dampfturbinenprozeß werden hauptsächlich drei Arten der Kohleverbrennung eingesetzt:

- Rostfeuerung
- Wirbelschichtverbrennung
- Kohlestaubfeuerung

Bedingt durch die Tatsache, daß die übliche Temperatur im Wasser-Dampf-Kreislauf 820 K beträgt, die Temperatur der Rauchgase jedoch deutlich höher ist, sind erhebliche Energieverluste die Folge. Deshalb bietet sich die Kombination eines Gas- und eines Dampfturbinenprozesses an.

Für den Einsatz kohlegefeuerter Gas- und Dampfturbinenprozesse ist die Konversion der Kohle unter Druck erforderlich. Hierfür stehen mehrere Verfahren zur Verfügung:

- Druckkohlevergasung und Verbrennung des Gases in der Turbinenbrennkammer
- Betrieb der Gasturbine mit dem Rauchgas einer:
  - Druckwirbelschichtverbrennung
  - Druckkohlestaubverbrennung
- Direkte Verbrennung von Kohlestaub in der Turbinenbrennkammer

---

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

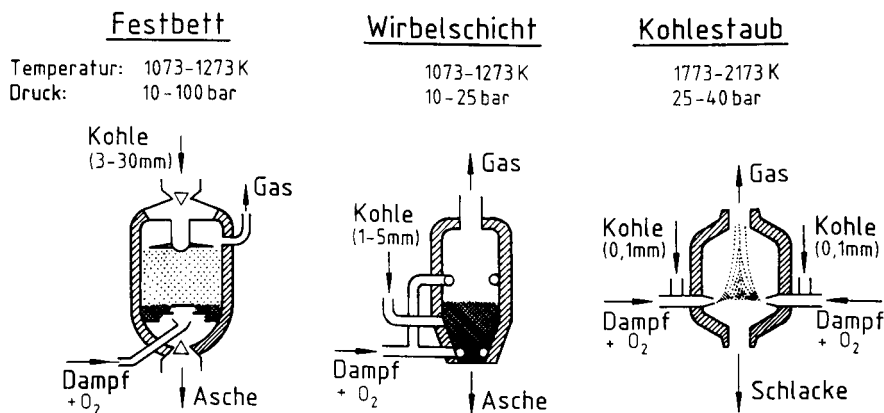


Abb. 1  
Verschiedene Kohlevergasungsreaktoren

Für die Kohlevergasung werden verschiedene Reaktoren eingesetzt, die in Abb. 1 gezeigt sind [1]. Die Kohlevergasung unter Druck führt zu unterschiedlichen Produktgasen mit, wie aus Tab. 1 zu ersehen ist, sehr unterschiedlichen Feststoffbelastungen.

Reaktortyp	Feststoffbelastung [g/Nm <sup>3</sup> ]
Festbett	1–6
Wirbelschicht	8–20
Kohlestaub	50–150

Tab. 1: Feststoffbelastung im Produktgas verschiedener Vergasungsprozesse [1]

Die bei der Druckvergasung, bzw. Druckverbrennung auftretenden Temperaturen und Drücke finden sich in Tab. 2.

	Temperatur K	Druck bar
Druckkohlevergasung	673–1273	10–100
Druckwirbelschichtverbrennung	1173	4–25
Druckkohlestaubverbrennung	1673–1773	4–25

Tab. 2: Temperatur und Druck verschiedener Kohlevergasungs- und Verbrennungsprozesse [2, 3]

Bedingt durch die Tatsache, daß die Druckkohlestaubverbrennung Gastemperaturen zwischen 1700 und 1800 K ergibt, ist dieser Prozeß in der Zukunft besonders interessant. Um dies zu verdeutlichen, sind in Abb. 2 die Nettowirkungsgrade verschiedener Prozesse in Abhängigkeit von der Gastemperatur aufgetragen. Die Druckkohlestaubverbren-

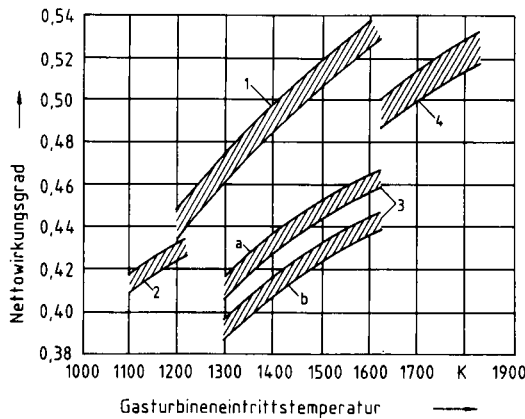


Abb. 2  
Nettowirkungsgrad verschiedener Kraftwerksprozesse

nung erreicht die Wirkungsgrade von erdgasbetriebenen Verfahren, allerdings erst bei erheblich höheren Temperaturen.

### Anforderungen an die Heißgasentstaubung

Zwei Hauptprobleme müssen gelöst werden: Die Entfernung fester und gasförmiger Verunreinigungen aus dem heißen Gas. Diese Forderung resultiert aus der Tatsache, daß die Turbinenhersteller bestimmte Anforderungen an das Gas zum Turbinenbetrieb stellen. Aus dem Gas müssen insbesondere gasförmige Komponenten, wie Natrium, Kalium, Vanadium, Blei, Zinn, Kalzium und Chlor entfernt werden [3]. Darüber hinaus gibt es scharfe Anforderungen bezüglich der Partikelgröße und der Konzentration des Feststoffes, die im Gas verbleiben dürfen. Abb. 3 gibt einen Eindruck von den Anforderungen verschiedener Gasturbinenhersteller. Besonders kritisch ist die Forderung, daß alle Partikel mit Durchmessern über 10  $\mu\text{m}$  abzuscheiden sind.

Für die Partikelabscheidung bei hohen Temperaturen und hohen Drücken sind grundsätzlich vier unterschiedliche Systeme einsetzbar:

- Filter:
  - Gewebe- bzw. Faserfilter
  - keramische Filter
  - Festbett- oder Wirbelschichtfilter
- Elektrofilter
- Zyklonabscheider
- Wäscher

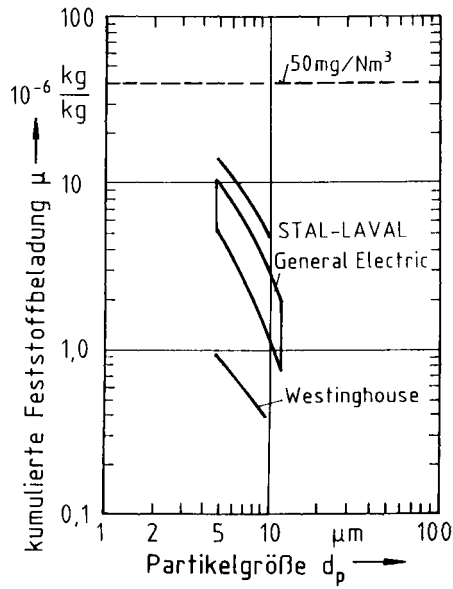


Abb. 3

Zulässige Feststoffbelastung und Partikelgrößen für Gasturbinenbetrieb [5]

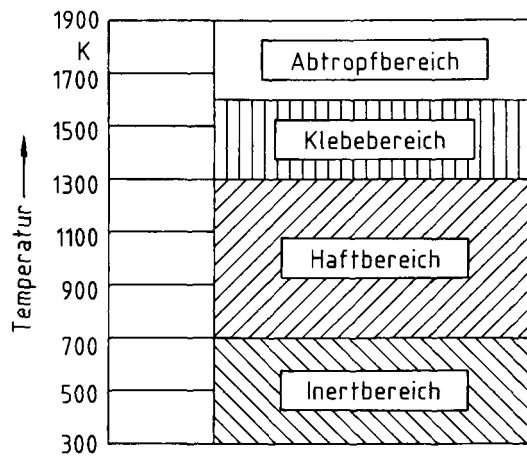


Abb. 4

Flugaschezustände in verschiedenen Temperaturbereichen [6]

Um die Einsatzmöglichkeiten dieser Abscheider beurteilen zu können, muß man sich die Flugaschezustände in verschiedenen Temperaturbereichen vergegenwärtigen. Abb. 4 zeigt als erste Orientierung den Temperatureinfluß auf das Austragsverhalten der abzuschheidenden Partikel. Bis zu Temperaturen von 700 K liegen die Feststoffe üblicherweise in fester Form vor und machen bei der Abscheidung und beim Austrag keine Probleme. Daran schließt sich ein Haftbereich an, der in den Bereich klebender Partikel übergeht, wenn die Feststoffe aufgrund der Temperatur plastisch werden. Der Übergang Inert- zum Haftbereich und vom Haft- zum Klebebereich kann sich je nach Aschezusammensetzung zu höheren Temperaturen verschieben. Ab 1100 K muß aber immer mit Austragsproblemen gerechnet werden. Erst bei Temperaturen um 1600 K liegt die Asche als hochviskose Schmelze vor, die zumindest tropffähig ist. Faßt man dieses Ergebnis zusammen, so ergeben sich die in Tab. 3 skizzierten Einsatzmöglichkeiten für die unterschiedlichen Abscheider. Ein Blick auf die Tabelle zeigt, daß der Zyklonabscheider derzeit das höchste Entwicklungspotential hat. Im folgenden wird deshalb nur die Heißgasentstaubung mit Zyklonabscheidern besprochen.

Temperatur	Zyklonabscheider	Naßabscheider	Filter	Elektrofilter
bis 1100 K feste Partikel, teilweise haftend	einsetzbar	einsetzbar, Wahl einer geeigneten Waschflüssigkeit	einsetzbar, keramische Filterelemente	einsetzbar
1100–1600 K klebrige Partikel, teilweise noch haftend	nicht einsetzbar, Ascheaustrag kaum möglich	nicht einsetzbar, geeignete Waschflüssigkeit nicht bekannt	nicht einsetzbar, Ascheaustrag kaum möglich	nicht einsetzbar, Ascheaustrag kaum möglich
über 1600 K Tropfen	einsetzbar, Verbesserung des Flüssigascheaustrags	nicht einsetzbar, geeignete Waschflüssigkeit nicht bekannt	nicht einsetzbar, geeignete Filterelemente nicht verfügbar	Kenntnisstand ungenügend. Elektrische Prozesse unbekannt

Tab. 3: Apparate zur Heißgasentstaubung [7]

### Zyklonabscheider

Zyklonabscheider sind einfache Apparate, in denen eine Rotationsströmung erzeugt wird, die zur Abscheidung der Partikel genutzt wird. In einem zylindrischen Apparat, der meist mit einem konischen Unterteil versehen wird, wird die Drallströmung entweder durch einen tangentialen Eintritt des feststoffbeladenen Gases erzeugt oder durch im

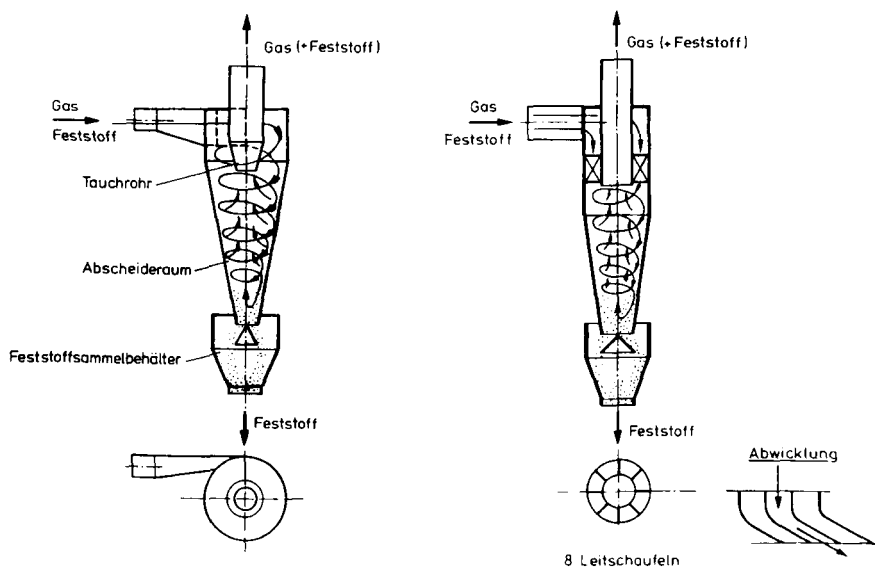


Abb. 5  
 Bauformen von Zyklonabscheidern  
 Links: Tangentialzyklon Rechts: Axialzyklon

Oberteil angebrachte Leitschaufeln. Dann spricht man von einem Axialzyklon (vergl. Abb. 5). In dieser Drallströmung wirken auf die Partikel Zentrifugalkräfte, die versuchen, die Feststoffpartikel nach außen an die Zyklonwand zu transportieren, wo sie abgeschieden werden. Da das gesamte Gas durch ein zentral angeordnetes Tauchrohr nach oben abströmt, versucht die nach innen gerichtete Gasströmung Feststoffpartikel mitzuschleppen. Von dem Kräftegleichgewicht zwischen der nach außen gerichteten Zentrifugalkraft und der nach innen gerichteten Widerstandskraft auf die Partikel hängt es ab, welche Partikelgröße abgeschieden und welche durchgelassen wird.

Wirbelströmungen, wie sie in Zyklonabscheidern auftreten, sind uns allen aus der Natur bekannt. Die optisch wirkungsvollsten, in ihren Auswirkungen jedoch meist verheerenden Wirbelströmungen, stellen die Hurrikane dar. Abb. 6 zeigt die Satellitenaufnahme einer Wolkenformation, die sehr schön eine Wirbelströmung veranschaulicht.

Ohne ins Detail gehen zu können, muß darauf hingewiesen werden, daß die im Zyklonabscheider auftretende Umfangsgeschwindigkeit für das Abscheideergebnis maßgeblich ist. Im Außenraum eines Zyklonabscheiders verhält sich diese Strömung nahezu wie ein Potentialwirbel, im Innern, das in etwa durch den Tauchrohrdurchmesser begrenzt wird, wie ein Starrkörperwirbel. Der in Abb. 7 skizzierte Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit zeigt, daß die höchste Umfangsgeschwindigkeit  $u_t$  auf dem Tauchrohr-radius  $r_t$  auftritt. Feststoffpartikel, die sich mit der Umfangsgeschwindigkeit  $u_t$  auf diesem Tauchrohr-radius  $r_t$  bewegen, unterliegen also der größten Zentrifugalbeschleunigung





Abb. 6

*Satellitenaufnahme einer Wolkenformation, die eine Wirbelströmung veranschaulicht.*

$\frac{u_i^2}{r_i}$ . Über das Kräftegleichgewicht zwischen Zentrifugalkraft und Widerstandskraft läßt sich nun leicht der Partikeldurchmesser berechnen, bei dem diese beiden Kräfte auf dem Tauchrohrradius, also bei der höchsten Zentrifugalbeschleunigung, im Gleichgewicht stehen [8]. Die geometrischen Abmessungen des Zyklonabscheiders und die Geschwindigkeiten können Abb. 8 entnommen werden.

Mit der Zentrifugalkraft

$$Z = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho) \frac{u_i^2}{r_i} \quad (1)$$

und der Widerstandskraft

$$W = 3\pi d_p \eta w_{ri} \quad (2)$$

folgt unter Beachtung der Radialgeschwindigkeit

$$w_{ri} = \frac{\dot{M}}{\rho} \cdot \frac{1}{2\pi r_i h} \quad (3)$$

für den Durchmesser der Partikel

$$d_p = 9 \frac{\eta}{(\rho_p - \rho)} \frac{\dot{M}}{\pi h u_i^2} \quad (4)$$

- a) Theorie:  $u \cdot r = \text{konst.}$   
 b) tatsächlicher Verlauf

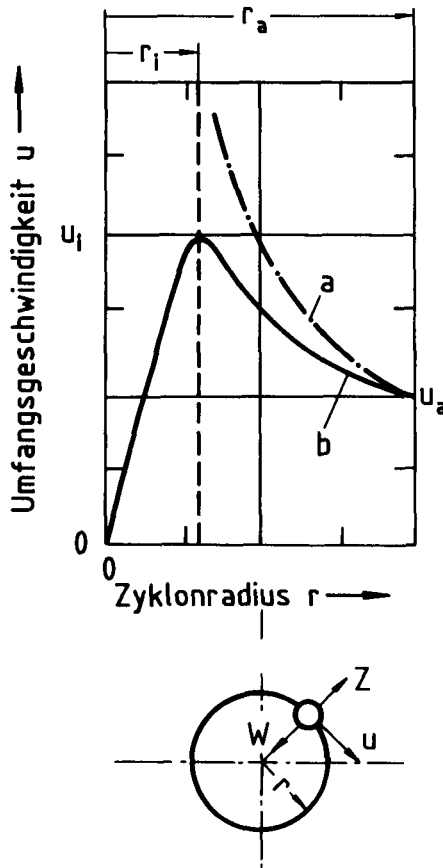


Abb. 7  
 Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit  
 im Zyklon und Kräftegleichgewicht  
 an einer Partikel

Partikel mit diesem Durchmesser können also weder nach außen wandern noch nach innen mitgenommen werden. Der Durchmesser dieser Partikel wird Grenzpartikeldurchmesser  $d_p^*$  genannt.

Zur Charakterisierung des Grenzpartikeldurchmessers kann man den sogenannten Fraktionsabscheidegrad benutzen. Der Fraktionsabscheidegrad gibt an, wie viele Partikel einer ganz bestimmten Partikelgröße, in einem Zyklonabscheider abgeschieden werden können. In dem besprochenen Idealfall bedeutet dies, daß alle Partikel, die einen

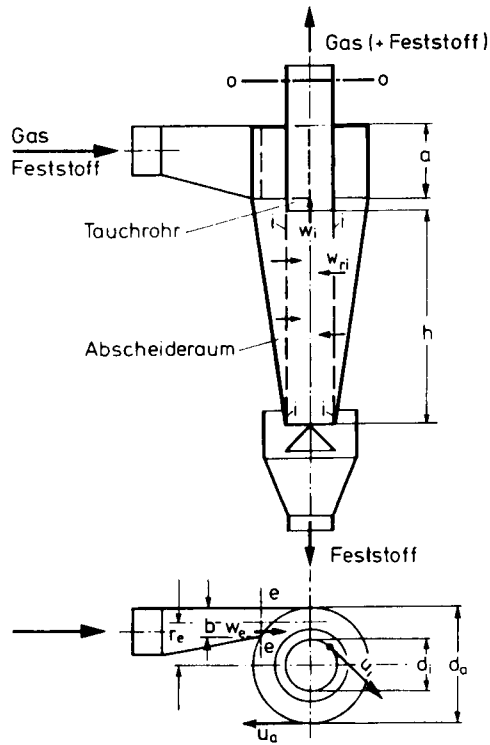


Abb. 8  
Hauptabmessungen des Zyklonabscheiders

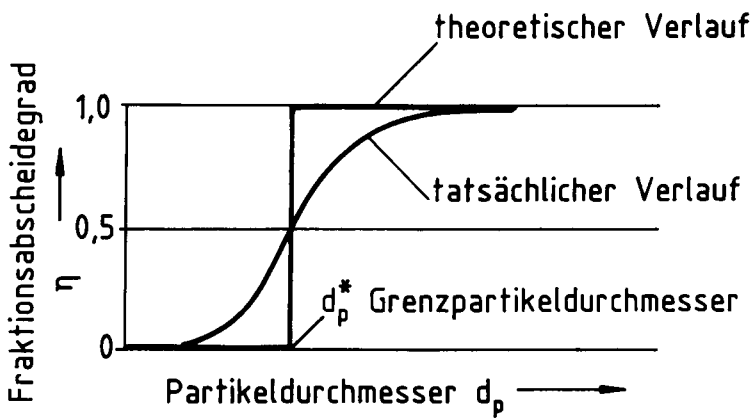


Abb. 9  
Fraktionsabscheidegradkurve

kleineren Durchmesser als den Grenzpartikeldurchmesser  $d_p^*$  haben nicht abgeschieden werden und alle, die größer sind völlig abgeschieden werden. Da im Zyklon jedoch eine hochturbulente Strömung herrscht, wird sich dieser Fall in Wirklichkeit nicht einstellen, sondern es ergibt sich eine S-förmige Fraktionsabscheidegradkurve, wie sie in Abb. 9 eingezeichnet ist. Zur Auslegung eines Zyklonabscheiders muß der Verlauf der Fraktionsabscheidegradkurve bekannt sein, da diese angibt, welcher Anteil einer bestimmten Partikelgröße abgeschieden werden kann.

## Experimentelle Untersuchungen

Um Aussagen über die Fraktionsabscheidegradkurven von Heißgaszyklonen, die bei unterschiedlichen Bedingungen betrieben werden, zu gewinnen, wurden am Institut für Verfahrens- und Kerntechnik der TU Braunschweig erstmals Fraktionsabscheidegradmessungen bei hohen Temperaturen durchgeführt. Die dazu eingesetzte Versuchsanlage zeigt Abb. 10. Mit einem Kompressor wird der erforderliche Gasstrom erzeugt, der mit Hilfe eines Bürstendosierers mit Feststoff beladen wird. Der feststoffbeladene Gasstrom gelangt in den Zyklonabscheider, in dem die Feststoffe abgeschieden werden. Der Gasstrom wird elektrisch aufgeheizt, wobei Temperaturen bis 1300 K erreicht werden. Die Feststoffdosiereinrichtung und der Zyklonabscheider sind in Druckgefäßen angeordnet, weil die Versuche auch bei Drücken bis zu 16 bar durchgeführt werden. Zur Be-

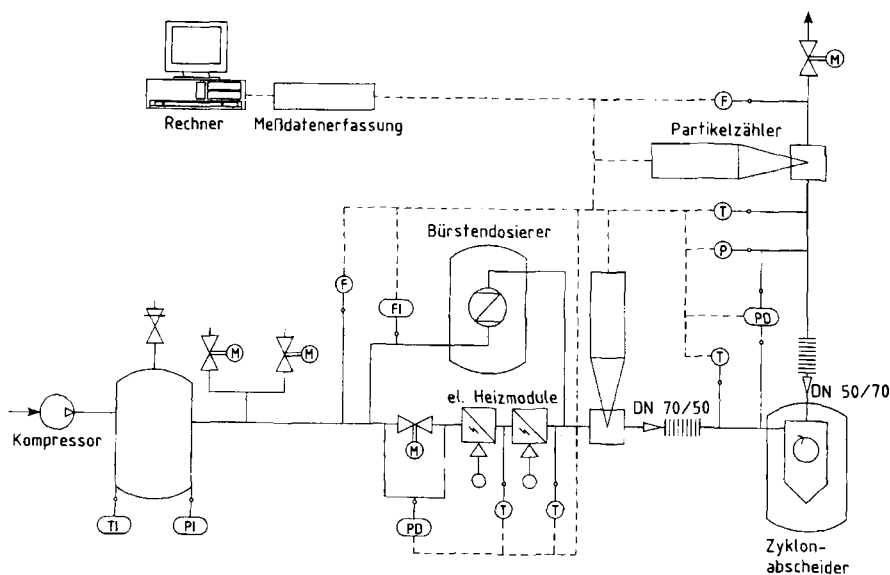


Abb. 10  
Versuchsanlage zur Heißgasentstaubung unter Druck

stimmung des Fraktionsabscheidegrades muß die Feststoffkonzentration und die Partikelgrößenverteilung im Rohgas, d.h. im Eintritt in den Zyklon und im Reingas, also im Austritt des Zyklons, bekannt sein. Da insbesondere die Abscheidung sehr kleiner Partikel mit Partikelgrößen unter  $10\ \mu\text{m}$  von Interesse ist, muß die Feststoffkonzentration und die Partikelgrößenverteilung in-line gemessen werden. Hierzu werden zwei Streulichtmeßgeräte eingesetzt, die derartige Messungen ermöglichen.

## Druckverlust

Neben dem Fraktionsabscheidegrad ist der Druckverlust des Zyklonabscheiders von Bedeutung, da die Energie für die Partikelabscheidung der Strömung entnommen werden muß. Da Druckverlustmessungen sehr viel einfacher durchzuführen sind, als Messungen des Fraktionsabscheidegrades, wurde zunächst überprüft, ob die schon früher entwickelten Berechnungsansätze zur Bestimmung des Druckverlustes [8] auch für hohe Temperaturen Gültigkeit haben. Als ein Beispiel zeigt Abb. 11 gemessene Druckverluste im Vergleich mit berechneten Kurven. Die Abbildung zeigt, daß die Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie sehr gut ist. Um derartige Druckverlustmessungen auch für geänderte Geometrien nutzen zu können, hat sich eine dimensionslose Dar-

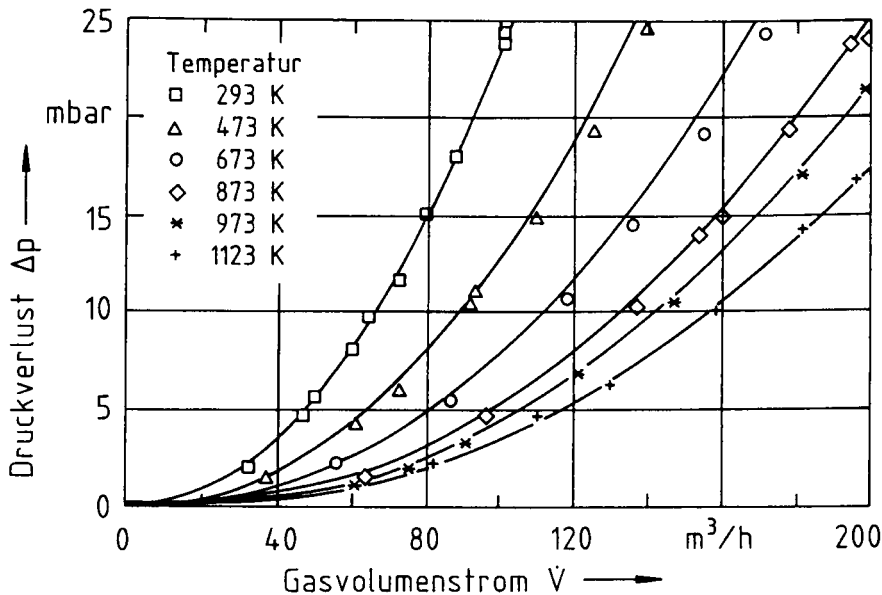


Abb. 11

Gemessene und berechnete Zyklondruckverluste für verschiedene Gastemperaturen

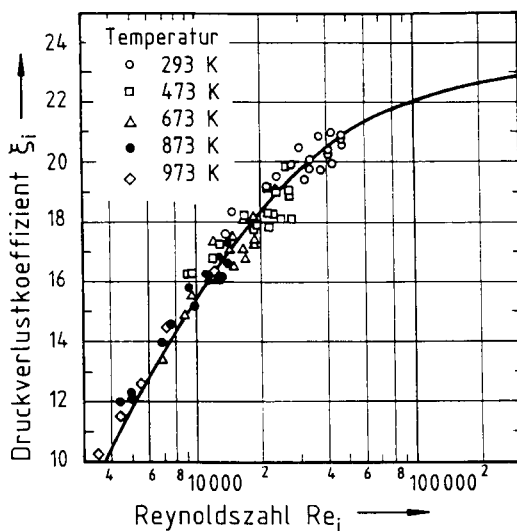


Abb. 12

*Druckverlustkoeffizient in Abhängigkeit von der Reynoldszahl der Tauchrohrströmung*

stellung des Druckverlustes bewährt. Abb. 12 zeigt experimentell bestimmte Druckverlustkoeffizienten in Abhängigkeit von einer auf die Tauchrohrströmung bezogenen Reynoldszahl  $Re_i = \frac{w_i d_i \rho}{\eta}$ . Die eingezeichnete Kurve gibt die berechneten Werte wieder.

Zur Berechnung der Druckverlustkoeffizienten

$$\xi_i = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} w_i^2} \quad (5)$$

teilt man den Druckverlustkoeffizienten in 2 Anteile auf

$$\xi_i = \xi_{ic} + \xi_{ii} \quad (6)$$

Hierbei beschreibt

$\xi_{ic}$  den Druckverlust im Eintritt des Zyklons sowie die Reibungsverluste und

$\xi_{ii}$  den Tauchrohrdruckverlust.

Aus einer Drehimpulsbilanz der Gasströmung findet man

$$\xi_{ic} = \frac{r_i}{r_a} \left[ \frac{1}{\left( 1 - \frac{u_i}{w_i} \frac{h}{r_i} \frac{1}{\lambda} \right)^2} - 1 \right] \left( \frac{u_i}{w_i} \right)^2 \quad (7)$$

$$\xi_{ii} = 0,8 \left[ 3 \left( \frac{u_i}{w_i} \right)^{4/3} + \left( \frac{u_i}{w_i} \right)^2 + 2 \right] \quad (8)$$

mit dem Wandreibungskoeffizienten

$$\lambda = 0,0049 + \frac{0,87}{\text{Re}_\tau} \quad (9)$$

und der Reynoldszahl

$$\text{Re}_\tau = \frac{w_i r_i \rho}{\eta} \left[ \frac{r_i/h}{r_a/r_i - 1} \right] \quad (10)$$

Zur Berechnung der Druckverlustkoeffizienten muß die Umfangsgeschwindigkeit  $u_i$  bekannt sein, die ebenfalls aus der Drehimpulsbilanz berechnet werden kann.

$$\frac{u_i}{w_i} = \frac{1}{\frac{F_c}{F_i} \cdot \frac{\alpha}{r_c/r_i} + \lambda \frac{h}{r_i}} \quad (11)$$

### Fraktionsabscheidegrad

Zur Berechnung des Fraktionsabscheidegrades wurde ein Verfahren entwickelt, das nachfolgend in seinen Grundzügen erläutert werden soll [9]. Abb. 13 zeigt die vereinfachte Zyklongeometrie zur Berechnung des Fraktionsabscheidegrades. Hierzu wird der Zyklon in verschiedene Bereiche eingeteilt. Beim Eintritt der Gas-/Feststoffströmung in den Zyklon sind zunächst zwei Bereiche zu unterscheiden. Aufgrund des hohen Druckgefälles vom Außenradius zur Mitte des Zyklons hin, bildet sich am Deckel eine Grenzschichtströmung aus, die Feststoffpartikel, die mit der Gasströmung eintreten, in Richtung auf die Tauchrohraußenseite transportiert. Diese Grenzschicht strömt am Tauchrohraußenmantel nach unten und tritt direkt in das Tauchrohr ein. Die Partikel, die mit dieser Grenzschichtströmung transportiert werden, haben also keine Chance, im Zyklon abgeschieden zu werden. Diesem Bereich 1 der Grenzschichtströmung schließt sich der Einlaufbereich 2 an, der Bereich der Abwärtsströmung ist mit 3 gekennzeichnet. Im Bereich 4, in der Nähe des Staubaustrages, kann eine Wiederaufwirbelung bereits abgeschiedener Partikel erfolgen, die dann im Bereich 5 der aufwärts gerichteten Strömung direkt ins Tauchrohr transportiert werden. Der Zyklon wird nun in axialer Richtung in infinitesimal kleine Volumenelemente aufgeteilt und für jedes Volumenelement und für jede Partikelgröße die Veränderung der Partikelkonzentration innerhalb dieses Volumenelementes berechnet. Dies sei an einem Beispiel erläutert. Im Bereich 3 wirken auf die Partikel die Zentrifugalkräfte, die versuchen, die Partikel nach außen an die Wand zu schleudern. Nach innen in den Bereich 5 der aufwärts gerichteten Strömung werden aber auch Partikel mitgenommen, die aufgrund des Strömungswiderstandes mit dem Gas nach innen transportiert werden. Darüber hinaus gibt es auch noch einen Partikel aus-

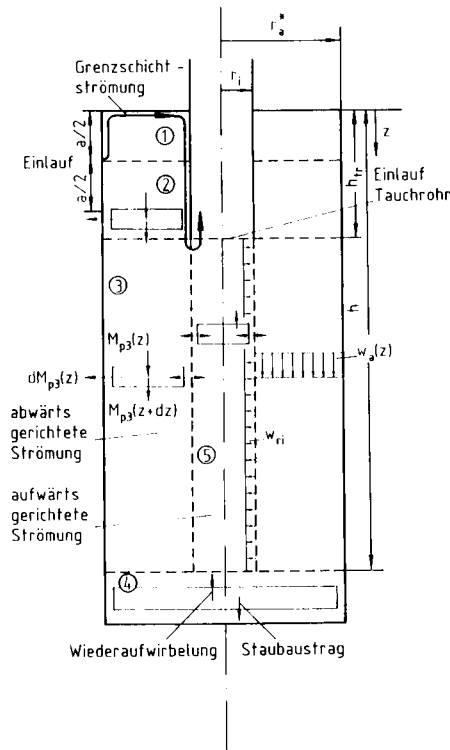


Abb. 13  
Vereinfachte Zyklongeometrie zur Berechnung des Abscheidegrades

tausch zwischen den Bereichen 3 und 5 aufgrund der turbulenten Strömung. Berechnet man nun für eine bestimmte Partikelgröße die Partikelbilanzen und vergleicht die Feststoffkonzentration im Eintritt des Zyklons mit der Feststoffkonzentration im Eintritt des Tauchrohres, so erhält man einen Punkt der Fraktionsabscheidegradkurve. Diese Berechnung ist nun für alle Partikelgrößen durchzuführen, um den vollständigen Verlauf der Fraktionsabscheidegradkurve zu gewinnen. In Abb. 14 sind beispielhaft experimentell bestimmte Fraktionsabscheidegrade mit berechneten Fraktionsabscheidegradkurven verglichen. Die Abbildung zeigt, daß die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ausgezeichnet ist.



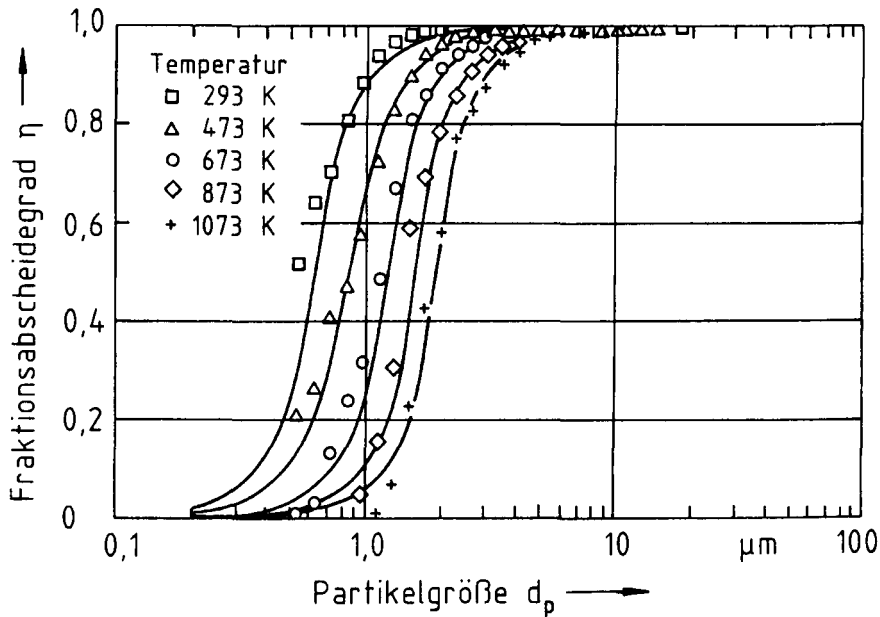


Abb. 14

Gemessene und berechnete Fraktionsabscheidegrade für verschiedene Temperaturen

### Zusammenfassung

Der derzeitige Stand der Erkenntnisse läßt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Berechnung des Fraktionsabscheidegrades und des Druckverlustes ist für Gas-temperaturen bis 1300 K mit guter Genauigkeit möglich. Es ergeben sich kaum Probleme beim Feststoffaustrag.
- Für den Temperaturbereich 1300–1600 K bereitet die Abscheidung kein Problem. Es ist aber keine technische Lösung für den Feststoffaustrag in Sicht.
- Die Berechnung des Fraktionsabscheidegrades und des Druckverlustes für Temperaturen über 1600 K erscheint möglich. Der Austrag der Flüssigasche aus Zyklonabscheidern ist jedoch noch nicht gelöst. Hier fehlt es vor allem an Kenntnissen über die Filmströmung hochviskoser Schmelzen an der Zyklonwand.

### Schrifttum

- [1] A. Lezno, K. Riedle, E. Wittechow: Entwicklungstendenzen steinkohlebefuerter Kraftwerke. Brennst.-Wärme-Kraft. 41 (1989) 13–22.
- [2] Programmreport Kohletechnik, Bundesminister für Forschung und Technologie, Bonn 1990.
- [3] H. Leibold, R. Mai: HTHD-Staubabscheidung bei fortgeschrittenen Kohleverstromungstechniken, KfK 4931, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 1991.

- [4] D. Pavone: Abscheidung von flüssigen Aschepartikeln aus Rauchgasen mit Hilfe von Zentrifugalabscheidern, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 3, Nr. 289, Düsseldorf 1992.
- [5] O.J. Tassiker: High Temperature High Pressure Electrostatic Precipitator for Electric Power Generation Technologies, An Overview of the Status, IChemE Symposium Series, Nr. 99, Gas Cleaning at High Temperatures, University of Surry (1986) 331- 349.
- [6] P. Käferstein, D. Köster, A. Hondl: Heißgasreinigung unter den Bedingungen klebend wirkender Aschestäube, GVC-Fachauschlußsitzung „Energieverfahrenstechnik“, 25. Februar 1994, Würzburg.
- [7] E. Weber, K. Hübner, D. Pavone, R. Schulz, H. Wiggers: Entwicklungsergebnisse bei der Druckkohlenstaubfeuerung, VGB-Konferenz Forschung in der Kraftwerkstechnik, 24./25. Februar 1993, Supplementband.
- [8] M. Bohnet: Optimalauslegung von Aerozyklonen, Chem.-Ing. Techn. 56 (1984) 416- 417.
- [9] T. Lorenz: Einfluß der Gastemperatur auf Trenngrad und Druckverlust von Zyklonen, Dissertation, TU Braunschweig, 1993.

## Symbolverzeichnis

a	[m]	Eintrittshöhe
b	[m]	Eintrittsbreite
d <sub>a</sub>	[m]	Zyklonaußendurchmesser
d <sub>i</sub>	[m]	Tauchrohrdurchmesser
d <sub>p</sub>	[m]	Partikeldurchmesser
h	[m]	Zyklonhöhe
u <sub>i</sub>	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit auf dem Tauchrohrradius
w <sub>i</sub>	[m/s]	Tauchrohrgeschwindigkeit
w <sub>ri</sub>	[m/s]	Radialgeschwindigkeit
Δp	[N/m <sup>2</sup> ]	Druckverlust
r <sub>a</sub>	[m]	Zyklonradius
r <sub>e</sub>	[m]	Einlaufradius
r <sub>i</sub>	[m]	Tauchrohrradius
F <sub>e</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Eintrittsquerschnitt
F <sub>i</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Tauchrohrquerschnitt
Ṁ	[kg/s]	Gasmassenstrom
T	[K]	Temperatur
α	[-]	Kontraktionskoeffizient der Eintrittsströmung
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	Gasdichte
ρ <sub>p</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	Feststoffdichte
η	[kg/m · s]	dynamische Viskosität
ξ <sub>i</sub>	[-]	Druckverlustkoeffizient
η	[-]	Fraktionsabscheidegrad
λ	[-]	Wandreibungskoeffizient

---

Prof. Dr.-Ing. Matthias Bohnet  
 Institut für Verfahrens- und Kerntechnik  
 Technische Universität Braunschweig  
 Langer Kamp 7 · 38106 Braunschweig

# KLASSENSITZUNGEN

HERBERT WELLING, Hannover

## Laser in der Ophthalmologie

Braunschweig, 10. Februar 1995\*

Das Auge ist ein optisches Organ und bietet sich in der Medizin hervorragend für therapeutische und diagnostische Anwendungen des Lichtes an. So ist es nicht verwunderlich, daß die Ophthalmologen schon immer als Vorreiter der Lasieranwendung in der Medizin galten. Die Photokoagulation der Netzhaut gehört mit zu den ersten therapeutischen Nutzungen des Laserlichtes, und sie ist auch heute noch die am meisten durchgeführte medizinische Lasieranwendung.

Weit über die Koagulation hinaus erstreckt sich heute der Einsatz des Lasers in der Augenheilkunde. Ein Ende in der fulminanten Entwicklung ophthalmologischer Lasersysteme ist nicht abzusehen.

### Wechselwirkungsmechanismen

Der Effekt, den man mit einem Laserstrahl am biologischen Gewebe erzielt, hängt neben der Wellenlänge und damit der optischen Eindringtiefe der Strahlung stark von der Laserintensität und der Wechselwirkungsdauer ab. In der Ophthalmologie verwendet man zum einen relativ niedrige Lichtintensitäten ( $\text{kW/cm}^2$ ), um gezielt Gewebe zu koagulieren. Oder aber man vaporisiert das Zielgewebe mit Hilfe von sehr kurzen ( $\text{ns-}\mu\text{s}$ ) Laserpulsen hoher Intensität ( $\text{MW-TW/cm}^2$ ) um das umgebende Gewebe möglichst wenig thermisch zu schädigen. Dies erreicht man mittels Photoablation bzw. Photodisruption.

### Laserkoagulation

Ziel der Laserkoagulation ist es, bestimmte Gewebeareale, etwa in der Netzhaut, durch Einwirken von Hitze gezielt zu zerstören. Typische Leistungen, die dabei verwendet werden, liegen im Bereich von einigen 100 mW bis hin zu 1 W bei einem Spotdurchmesser auf der Retina zwischen 50–100  $\mu\text{m}$ . Die Einstrahlzeit beträgt wenige 100 ms. Der gewünschte biologische Effekt tritt bereits nach einer Temperaturerhöhung von wenigen 10 °C auf. Es kommt zum Erliegen der Enzymtätigkeiten, zur Denaturierung der Proteine und schließlich zur Blutgerinnung in den Gefäßen.

---

\* Zusammenfassung eines Vortrags vor der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

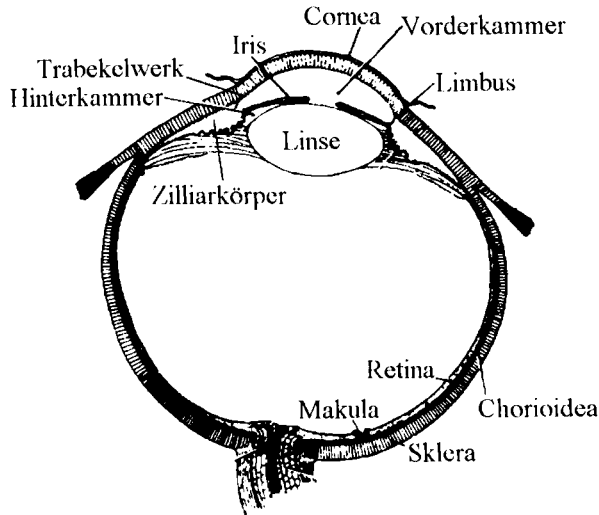


Abbildung 1:  
Schematische Übersicht über die Anatomie des Auges (nach [Fre 85])

Bei der Auswahl der Wellenlänge und damit des Lasertyps richtete man sich lange Zeit nach dem Zielgewebe, welches vornehmlich koaguliert werden sollte. Handelte es sich dabei um Blutgefäße, so war man bestrebt, die hohe Absorption des Hämoglobins im grünen Spektralbereich auszunutzen. Das Xanthophyll und das Melanin des Retinalen Pigmentepithels (RPE) absorbieren im blauen Spektralbereich. Hier erschien die blaue Linie des Ar<sup>+</sup>-Lasers (488 nm) als optimale Wellenlänge [Tre 82]. Jüngere Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß sich eine Differenzierung der Wellenlänge am Hinterabschnitt des Auges letztlich nicht als sinnvoll erwiesen hat. Das Ausmaß der thermischen Schädigungszone ist in der Regel trotz selektiver Absorption größer als die räumliche Entfernungen der unterschiedlichen Chromophore. Lediglich im Bereich der Makula („gelber Fleck“, Stelle des schärfsten Sehens, vgl. Abb. 1) ist aufgrund der Blaulicht-Intoxikation der Lichtrezeptoren von der Behandlung mit blauem Licht (488 nm) abzu sehen.

Ist man hingegen bestrebt, relativ große Volumina zu koagulieren, bietet sich die im nahen IR gelegenen Linien des Nd:YAG Lasers (1064 nm) bzw. die Diodenlaser an (780–850 nm). In diesem Spektralbereich haben sämtliche Chromophore ihr Absorptionsminimum, so daß hauptsächlich die Streuung bei der Verteilung der Lichtenergie im Gewebe eine Rolle spielt.

## Klinische Anwendungen der Laserkoagulation

Bei den meisten Diabetikern ist mit zunehmendem Alter eine Veränderung des Augenhintergrundes zu beobachten (*Diabetische Retinopathie*). Sie äußert sich in sackförmigen Ausweitungen kleiner Blutgefäße, kleinere und größere Blutungen, Bildung von Ödemen und Neubildung von minderwertigen, brüchigen Gefäßen (Proliferative Diabetische Retinopathie, PDR). Mit fortschreitender Erkrankung ist eine zunehmende Sehverschlechterung, bis hin zur völligen Erblindung zu beobachten. Erste Ansätze der Lasertherapie konzentrierten sich auf eine direkte, massive Verödung der neovaskulären Strukturen, die jedoch gerade den Krankheitsverlauf der PDR häufig beschleunigten. Heute weiß man, daß man indirekt, durch zusätzliches Erzeugen mehrerer hundert Koagulationsherde in der peripheren Netzhaut dem Krankheitsverlauf und damit der zunehmenden Sehverschlechterung Einhalt gebieten kann. Der Schlüssel zum Erfolg liegt hier in der Zerstörung eines großen Anteils der peripheren Photorezeptoren der Retina, die einen hohen Sauerstoffbedarf zeigen und damit als Stimulus der Neovaskularisation wirken. Eine Einschränkung des peripheren Sehvermögens ist bei dieser Behandlungsmethode nicht zu erwarten. Selbst wenn ein Großteil des Netzhautareals koaguliert worden ist, setzt das Gehirn sich das Bild rasterförmig, aus den übriggebliebenen intakten Arealen wieder zusammen.

Die *Senile Makuladegeneration (SMD)* gehört mit zu den häufigsten Erblindungsursachen in den Industrieländern. Der Krankheitsverlauf zeigt sich in der Entwicklung neuer choroidaler Blutgefäße. Die Gefäße können im Bereich der Makula brüchig werden. Eine Ansammlung der Exudate im Bereich der Makula führen zu zunehmender Sehschärfe bis hin zum völligen Verlust des zentralen Sehens. Bei der Behandlung der SMD mit Hilfe von Laserlicht ist man bestrebt, die abnormen Blutgefäße der Aderhaut durch Koagulation zu verschließen. Ähnlich wie im Falle der diabetischen Neovaskularisation kann man auch hier davon ausgehen, daß durch die Laserbehandlung die Freigabe von Stoffen gefördert werden kann, welche eine Neovaskularisation verhindern helfen [McM 83].

Bei einer drohenden *Netzhautablösung* ist der behandelnde Arzt bestrebt, Koagulationsherde rund um die Gefahrenstelle zu applizieren, um so eine lokale Narbenbildung hervorzurufen. Das neu gebildete Narbengewebe hält Netzhaut und Aderhaut fester zusammen.

Im vorderen Abschnitt des Auges findet die Laserkoagulation ebenfalls therapeutische Anwendungen. Glaukompatienten, bei denen eine medikamentöse Therapie zur Senkung des Augeninnendruckes ebenso erfolglos blieb wie filtrationschirurgische Maßnahmen (Sklerostomie, Trabekulektomie), kann eine sog. Zyklphotokoagulation mit dem Nd:YAG oder mit einem Diodenlaser den normalen Augendruck wiederherstellen. Ziel der Zyklphotokoagulation ist es, einen Teil des Ziliarkörpers (Abb. 1), in dem das Kammerwasser produziert wird, definiert zu zerstören, um dadurch die Kammerwasserproduktion einzuschränken. Dabei wird der Laserstrahl im Bereich des Limbus (Übergang Hornhaut/Aderhaut) von außen per Lichtleiter appliziert. Die Laserstrahlung durchdringt die Aderhaut und wird vom pigmentiertem Anteil des Ziliarkörpers absorbiert.

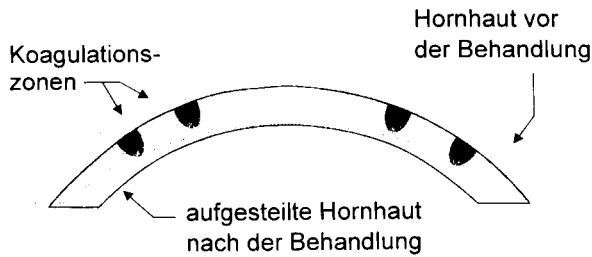


Abbildung 2:

*Prinzip der photothermischen Keratoplastie zur Korrektur der Weitsichtigkeit. Außerhalb der optischen Zone werden punktförmig Teile des Hornhautstromas erwärmt. Die Folge ist eine örtliche Verkürzung der Kollagenfasern, welches die Hornhaut lokal strafft*

Zur Korrektur der Weitsichtigkeit (Hyperopie) befindet sich derzeit ein Verfahren in klinischer Erprobung, bei dem mit dem Ho:YAG Laser gezielt Teile des Hornhautstromas erwärmt werden. Die Folge ist eine örtliche Verkürzung der Kollagenfasern, welches die Hornhaut lokal strafft (Abb. 2). Der Ho:YAG Laser emittiert bei einer Wellenlänge von  $2,06\ \mu\text{m}$ . Diese Strahlung dringt nur wenige  $100\ \mu\text{m}$  in das Hornhautstroma hinein. Mit einer Pulslänge im Bereich von Millisekunden läßt sich der gewünschte Temperaturverlauf ( $60^\circ\text{--}85^\circ\text{C}$ ) im Stroma entsprechend steuern. Über die Langzeitstabilität dieses Verfahrens läßt sich derzeit noch keine sichere Aussage machen. Korrekturen von bis zu  $+4\ \text{dpt}$  sind bereits erfolgreich durchgeführt worden und über einen Zeitraum von mehreren Monaten mit ausreichender Stabilität beobachtet worden.

### Photoablation

Der Begriff Ablation wird häufig für viele Laseranwendungen benutzt, bei denen auch eine massive Koagulation des bestrahlten Gewebes mit zum therapeutischen Eingriff gehört. Im folgenden steht der Begriff Photoablation für das Abtragen von Gewebe mit minimaler Traumatisierung des zurückbleibenden Gewebes. Erreicht wird diese Form der Gewebearbeitung mit Hilfe kurzer ( $\text{ns-}\mu\text{s}$ ) Laserpulse und mit einer Wellenlänge bei der die optische Eindringtiefe der Laserstrahlung im Gewebe möglichst gering, d. h. in der Größenordnung von  $1\ \mu\text{m}$ , ist. In Frage kommen dafür Laser die entweder im tiefen UV emittieren (ArF-Excimerlaser,  $\lambda = 193\ \text{nm}$ ). In diesem Spektralbereich sind die Proteine und die im Gewebewasser gelösten Salze für die hohe Absorption verantwortlich. Oder aber man verwendet Infrarot-Laser, die bei einer Wellenlänge um  $3\ \mu\text{m}$  emittieren (Er:YAG,  $\lambda = 2,94\ \mu\text{m}$ ). Hier kann die starke Absorption des Wassers nutzbar gemacht werden. Der Wasseranteil von biologischem Weichgewebe liegt im Bereich zwischen 70% und 90%.

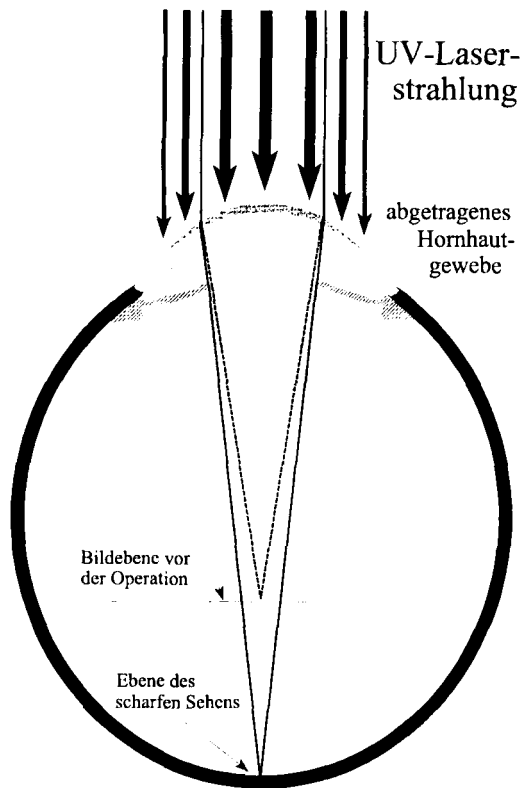


Abbildung 3:

*Myopiekorrektur mit dem Excimerlaser. Das Zentrum der optischen Zone der Hornhaut wird abgeflacht. Die Tiefe des Abtrages beträgt, je nach Größe der Bearbeitungszone nur 8–12 µm pro korrigierter Dioptrie. In der Schemazeichnung ist die Abtragtiefe aus Anschauungsgründen übertrieben dargestellt*

### Klinische Anwendungen der Photoablation

Eine ophthalmologische Laseranwendung, die in jüngster Zeit einen enormen technologischen Schub in der Laserentwicklung in Gang gesetzt hat, die aber auch größte publizistische Aufmerksamkeit erfahren hat, ist die Korrektur von Fehlsichtigkeiten durch direkte Modellierung der Hornhautoberfläche. Die *Photorefraktive Keratektomie (PRK)* mit dem ArF-Excimerlaser hat sich 12 Jahre nach den ersten experimentellen Erfahrungen mit der UV-Photoablation an biologischem Gewebe [Tro 83] zu einer wissenschaftlich anerkannten und sehr erfolgreichen klinischen Laseranwendung entwickelt.

Der Laser wird hierbei eingesetzt, um in der zentralen optischen Zone der Hornhaut die Krümmungsradien der Oberfläche zu ändern, um damit den entsprechenden Betrag der

Fehlsichtigkeit des Auges zu korrigieren. Bei der Kurzsichtigkeit (Myopie) wird die Hornhaut abgeflacht. Die Tiefe des zentralen Abtrages beträgt, je nach Größe der Bearbeitungszone, etwa 8 bis 12  $\mu\text{m}$  pro Dioptrie (Abb. 3).

Es liegen inzwischen über 7jährige Erfahrungen mit dem PRK-Verfahren vor. Schätzungsweise sind weltweit an deutlich über 500.000 Patienten myope und astigmatische Augen behandelt worden. Ergebnisse mit Erfolgsraten von 95–98% bei Korrekturen von –4 dpt und mehr als 90% bei Korrekturen von bis zu –6 dpt wurden in kontrollierten klinischen Studien erhoben. Ein Eingriff wird dann als Erfolg gewertet, wenn der Patient 1 Jahr nach seinem Eingriff in seiner Refraktion weniger als 1 dpt von Null entfernt liegt und sein alltägliches Leben ohne Brille meistern kann.

Obwohl sich der Schwerpunkt der PRK-Forschung auf den ArF-Excimerlaser konzentriert hat, gab es immer wieder Anstrengungen, nach Alternativen für den Excimerlaser zu suchen. Der Nachteil dieses Lasersystems sind seine relativ großen Abmessungen, die für den Betrieb notwendigen toxischen Gase sowie die Tatsache, daß es sich bei der UV-Laserstrahlung um potentiell mutagene Strahlung handelt. Letztere Befürchtung hat sich hinsichtlich der Behandlung von Hornhautgewebe in zahlreichen Studien als unbegründet herausgestellt [Geb 90, Koc 91, Lub 92, 94]. Dennoch ist die Motivation, die beiden übrigen Nachteile mit einem sehr viel kleineren und damit auch preisgünstigeren Festkörperlaser beheben zu können, stark genug um weitere Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet zu unternehmen. Ein aussichtsreicher Kandidat für die Ablösung des Excimerlasers in der Medizin ist der Er:YAG Laser. Wenn auch derzeit die Bearbeitungsqualität der 3  $\mu\text{m}$ -Laserstrahlung noch deutlich unterhalb derjenigen der 193 nm-Strahlung liegt, so gibt es dennoch vielversprechende Ansätze, die Infrarot-Photoablation auch für die Refraktive Laserchirurgie nutzbar zu machen. Eines der Hauptprobleme, die sich beim Er:YAG Laser stellen, ist seine relativ große Abtragsrate von mehreren  $\mu\text{m}$  pro Puls. Durch den Pulscharakter der Laserstrahlung entstehen kleine Stufen auf der bearbeiteten Hornhautoberfläche (Abb. 4). Die Höhe der Stufen entspricht dem Abtrag eines Laserpulses. Der ArF-Excimerlaser hat eine Abtragsrate von nur 0,2–0,5  $\mu\text{m}$  pro Puls bei einer Energiedichte von 120 bis 180  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ . Dies reicht aus, um die Oberfläche der Hornhaut genau genug zu modellieren. Die nach dem operativen Eingriff verbleibenden Stufen werden von dem obersten Deckhäutchen, dem Epithel, welche ohnehin vor jeder Operation mechanisch entfernt wird und dann aber wieder nachwächst, ähnlich wie der Feinputz auf einer rauen Wand, ausgeglichen. Beim Er:YAG Laser sind diese Stufen jedoch zu hoch. Bende und Mitarbeiter [Ben 92] haben gezeigt, daß es möglich ist, durch einen Flüssigkeitsfilm auf der Kornea während der Ablation die Ablationsrate zu verringern und gleichzeitig die verbleibende Oberflächenrauigkeit zu verbessern. Seiler und Mitarbeiter haben vorgeschlagen, das Gaußprofil in der Intensitätsverteilung des Laserstrahls auszunutzen um zumindest für die Myopiekorrektur die Hornhautoberfläche entsprechend abzuflachen. Auf diese Art könnten ohne zusätzliche Strahlformung allein mit dem Grundmode des Lasers, je nach Pulsenergie Lentikel zwischen –0,25 dpt und mehreren Dioptrien pro Puls von der Hornhautoberfläche abgetragen werden. Es bleibt dennoch das Problem der vergleichsweise hohen thermische Schädigung des nicht abgetragenen Gewebes in der Größenordnung von einigen wenigen  $\mu\text{m}$  bestehen. In-vivo Un-



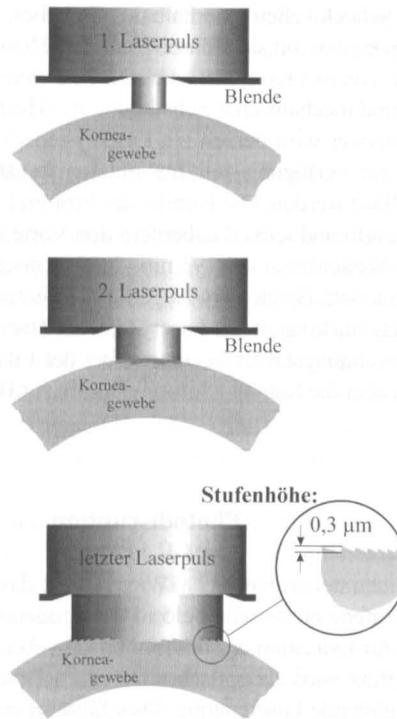


Abbildung 4

Durch den Pulscharakter der Laserstrahlung entstehen unter sich kontinuierlich öffnenden Irisblende kleine Stufen auf der bearbeiteten Hornhautoberfläche. Die Höhe der Stufen entspricht dem Abtrag eines Laserpulses. Nach dem operativen Eingriff werden diese von dem obersten Deckhäutchen, dem Epithel, wieder ausgeglichen.

tersuchungen müssen zeigen, in wie weit das Hornhautgewebe dieses Ausmaß an Schädigung toleriert, ohne Narbenbildung mit entsprechender Minderung der Sehfähigkeit zu hinterlassen. Eine Möglichkeit der Verringerung der thermischen Schädigung ließe sich durch eine Verkürzung der Pulsdauer erreichen. Die Probleme zeigen sich hier jedoch auf der technischen-physikalischen Seite. Gewöhnlich verkürzt man einen Laserpuls sehr effektiv mit Hilfe eines sogenannten Güteschalters, der während des optischen Pumpvorganges dafür sorgt, daß die optische Energie im Laserkristall zunächst gespeichert wird und erst am Ende des Pumpulses die gesamte Energie innerhalb sehr kurzer Zeit (einige ns) als Laserlicht hoher Intensität freigegeben wird. Leider gibt es derzeit nur wenige optische Materialien, die für Licht der Wellenlänge um  $3 \mu\text{m}$  transparent genug sind und eine ausreichend hohe Zerstörschwelle besitzen, so daß es technisch sehr schwierig ist, entsprechende Lasersysteme aufzubauen. Darüber hinaus werden bei dieser Form der Photoablation die Ablationsfragmente mit enorm hoher Geschwindigkeit von der Gewebeoberfläche entfernt. Aufgrund des induzierten Rückstoßes entwickeln

sich sehr intensive Schockwellen innerhalb des Gewebes, die ein erhebliches mechanisches Schädigungspotential mit sich führen [Lub 93]. Theoretische Untersuchungen zeigen, daß Pulsängen von mehreren 100 ns bis zu 1  $\mu$ s einen optimalen Kompromiß zwischen thermischer und mechanischer Schädigung des Hornhautgewebes darstellen. Am Laser Zentrum Hannover wird derzeit ein Lasersystem entwickelt, welches Pulse entsprechender Länge zur Verfügung stellt und mit dem in naher Zukunft erste in-vitro Experimente durchgeführt werden. Die Familie der Erbium Laser bieten neben ihrer Kompaktheit und Wartungsfreundlichkeit außerdem den Vorteil, daß sich ihre Strahlung, im Gegensatz zur UV-Wellenlänge bei 193 nm, durch optische Fasern führen läßt. Damit wird auch der intraokulare Bereich am Auge für die Photoablation zugänglich gemacht. Derzeitige Laboruntersuchungen am Laser Zentrum Hannover versprechen eine Vielzahl möglicher Anwendungsfelder beginnend bei der Filtrationschirurgie zur Behandlung des Glaukoms über die Kataraktchirurgie bis hin zur Bearbeitung epiretinaler Membranen.

### Photodisruption

Bei extremen Lichtintensitäten ( $> 1 \text{ GW/cm}^2$ ) liegt das durch die fokussierte Laserstrahlung hervorgerufene elektrische Feld in der Größenordnung atomarer elektrischer Felder. Es kommt zur Ionisation des bestrahlten Gewebes und damit zur Bildung eines Plasmas. Dieser Effekt wird als optischer Durchbruch bezeichnet. Das Plasma absorbiert die weiter einfallende Laserenergie. Dies führt zu einer schlagartigen Aufheizung und Expansion des Plasmas. Es entstehen, lokal eng begrenzt, Temperaturen von etwa 15.000 K und Drücke von über 1000 bar. Der optische Durchbruch muß nicht zwingend an einer Oberfläche stattfinden, sondern kann auch bei starker Fokussierung des Laserstrahls in einem transparenten Medium im freien Raum erfolgen. Diese Möglichkeit macht die Photodisruption für intraokulare Anwendungen sehr interessant.

### Klinische Anwendungen

Bei der Behandlung des grauen Stars (Katarakt) wird die opake natürliche Linse entnommen, um sie durch eine künstliche zu ersetzen. Gewöhnlich läßt man bei dieser Operation den hinteren Teil des Kapselsackes an seinem Platz, um postoperative vitreoretinale Komplikationen zu vermeiden. Diese Kapselmembran kann sich nach einiger Zeit selbst eintrüben und die Sehfähigkeit des Patienten erheblich reduzieren. Man spricht hier auch vom sog. *Sekundärem Katarakt*. Vor der Anwendung des Lasers, wurde mit einer Nadel, die man in das Auge einführte die Linsenkapsel mechanisch eröffnet. Heute kann man mit dem gütegeschalteten Nd:YAG Laser die Linsenkapsel eröffnen, ohne dabei erneut das Risiko eines invasiven Eingriffes tragen zu müssen.

Die *Iridotomie* ist eine der wirksamsten Operationsmethoden beim Winkelblockglaukom. Der Nd:YAG-Laser perforiert dabei einen Teil der Iris, die sich infolge eines Rückstaus des Kammerwassers an das Trabekelwerk angelegt hat und somit den Abfluß des

Kammerwassers verhindert. Die Folge ist ein massiver Anstieg des intraokularen Druckes. Durch die Eröffnung der Iris wird der Rückstau vermindert und das Kammerwasser kann durch das Trabekelwerk wieder abfließen.

## Diagnostische Lasersysteme

Neben den therapeutischen Einsatzmöglichkeiten bietet der Laser auch die Möglichkeit, zahlreiche diagnostische Anwendungen am Auge durchzuführen. Das Scanning-Laser-Ophthalmoskop (SLO) gestattet es, Videobilder der Retina mit exzellenter Tiefenschärfe aufzunehmen. Ein Laserstrahl mit geringer Leistung ( $\mu\text{W}$ ) rastert den Augenhintergrund in vertikaler und horizontaler Richtung ab [Web 80, Wei 89, Fra 93]. Mit Hilfe von konfokalen Beobachtungstechniken lassen sich so beispielsweise dreidimensionale Bilder des Sehnervenkopfes erzeugen. Durch Injektion eines fluoreszierenden Farbstoffes (ICG, Fluoreszein) erhält man hochauflösende angiographische Aufnahmen des Gefäßsystems der Netzhaut.

Die Optische Kohärenz Tomographie (OCT) ist ebenfalls ein bildgebendes Verfahren, mit dem ähnlich wie beim Ultraschall B-Mode hochauflösende Schnittbilder des Auges erzeugt werden können [Swa 93, Iza 93]. Ortsinformation erhält man bei diesem System auf der Grundlage der sog. „Low-Coherence-Interferometry“. Bei dieser Technik erhält man auf einem Detektor nur dann Interferenzringe, wenn die optische Weglänge des aus dem Auge reflektierten Lichtes innerhalb der Kohärenzlänge des Lichtweges im Referenzarm des Interferometers liegt. Eine Superluminiszenzdiode als Lichtquelle ermöglicht longitudinale Auflösungen um  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Die transversale Auflösung ist durch die Spotgröße des Lichtstrahles gegeben und liegt im Bereich von wenigen  $\mu\text{m}$ . Optische Heterodyn-Verfahren und die Verwendung von Rauschunterdrückungstechniken, wie sie bei der optischen Kommunikationstechnik verwendet werden, ermöglichen selbst die Detektion von Licht, welches aus dem inneren der Netzhaut zurückgestreut wird. Es gibt derzeit kein vergleichbares bildgebendes Verfahren, mit dem man Schnittbilder des Augenhintergrundes mit einer derartig hohen Auflösung erstellen kann. Der klinische Wert der Informationen, die mit diesem Verfahren gewonnen werden, kann derzeit noch gar nicht abgeschätzt werden. Die neu eröffnete optisch-mikromorphologische Dimension verspricht weitreichende Fortschritte in der Pathophysiologie und Diagnostik.

## Literatur

- [Ben 92] Bende T., Jean B., Matallana M., Seiler T.; Wet areal ablation with the erbium:YAG laser (2,94): first results; *Lasers Light Ophthalmol* 5(1), 39–44 (1992)
- [Fra 93] Frambach D.A., Dacey M.P., Sadun A; Stereoscopic photography with a scanning laser ophthalmoscope; *Am.J.Ophthalmol* 116, 484–488 (1993)
- [Fre 85] Freyler H; *Augenheilkunde*; Springer Wien, New York (1985)
- [Iza 93] Izatt J.A., Hee M.R., Huang D.; Micron resolution biomedical imaging with optical coherence tomography; *Optics & Photonics News* Oct 14–18 (1993)

- [Koc 91] Kochevar I.E., Walsh A.A., Green H.A., Sherwood M., Shih A.G., Sutherland B.M.; DNA damage induced by 193-nm radiation in mammalian cells; *Cancer Research* 51, 288–293 (1991)
- [Lub 93] Lubatschowski H., Kermani O., Asshauer T.; Zur Photoablation der Hornhaut mit gepulster 2790 nm ErCr:YSGG-Laserstrahlung; *Ophthalmologie* 90, 183–190 (1993)
- [Lub 92] Lubatschowski H., Kermani O.; 193 nm Excimerlaserphotoablation der Hornhaut; *Ophthalmologie* 89, 134–138 (1992)
- [Lub 94] Lubatschowski H., Kermani O., Otten C., Haller A., Schmiedt K., Ertmer W.; ArF-excimer laser induced secondary radiation in photoablation of biological tissues; *Lasers Surg. Med.* 14, 168–177 (1994)
- [McM 83] McMeel J.W., Avila M.P., Jalkh A.E.; Subretinal neovascularisation in senile macular degeneration; *Trans New Orleans Acad Ophthalmol* 291–298 (1983)
- [Swa 93] Swanson E.A., Izatt J.A., Hee M.R.; In vivo retinal imaging by optical coherence tomography; *Optics Lett* 18, 1864–1866 (1993)
- [Tre 82] Trempe C.L., Mainster M.A., Pomerantzeff O.; Macular photocoagulation: Optimal wavelength selection; *Ophthalmology* 89, 721–728 (1982)
- [Tro 83] Trokel S.L., Srinivasan R., Braren B.; Excimer laser surgery of the cornea; *Am.J.Ophthalmol.* 96, 710–715 (1983)
- [Geb 90] Gebhart E., Lang G.K., Tittelbach H., Rau D., Naumann G.O.H; Untersuchungen zur Chromosomenmutagenität eines 193-nm-Excimerlasers; *Fortschr. Ophthalmol.* 87, 229–233 (1990)
- [Web 80] Webb R.H., Hughes G.W., Pomerantzeff O.; Flying spot TV ophthalmoscope. *Applied Optics* 19, 2991–2997 (1980)
- [Wei 89] Weinreb R.N., Dreher A.W., Bille J.P.; Accuracy of topographic measurements in a model eye with the laser tomographic scanner; *Invest Ophthalmol Vis Sci* 32, 2992–2996 (1991)

---

Prof. Dr. H.Welling  
 Institut für Quantenoptik der Universität Hannover  
 Welfengarten 1 · 30167 Hannover

WOLFGANG J. STAHL, Hannover

## Tiefengas, eine Energie der Zukunft?

Hannover, 12. Mai 1995\*

### 1. Einleitung

Unter dem Begriff Tiefengas wird Erdgas verstanden, das überwiegend aus Methan besteht und dessen Mutter- und Speichergesteine in Tiefenbereichen unterhalb der heutigen Ziele der industriellen Exploration ( $> 7$  km) liegen. In Norddeutschland stammen die in den Formationen vom Oberkarbon und Rotliegenden bis zur Trias auftretenden Gaslagerstätten (Fig. 1) aus organischen Substanzen, die vor etwa 320 Millionen Jahre in oberkarbonischen Sedimenten abgelagert wurden.

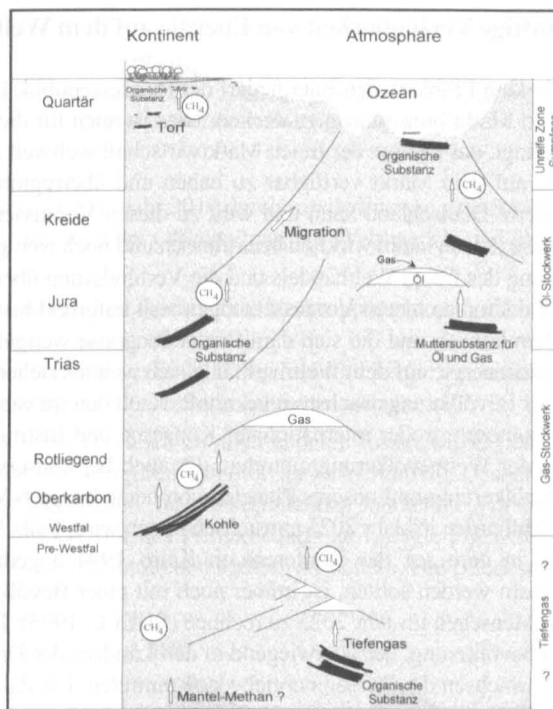


Fig. 1:

Schematische Darstellung der Kohlenwasserstoff-Stockwerke in Norddeutschland

\* Zusammenfassung eines Vortrags vor der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Nachdem die Exploration auf Erdöl in der Bundesrepublik eingestellt worden ist und die Förderung aus den noch bestehenden Erdölfeldern nur einen sehr geringen Anteil des deutschen Bedarfs decken kann, werden in naher Zukunft auch die aus dem Oberkarbon sich ableitenden Gaslagerstätten ausexploriert sein. Danach wird die Förderung, die zur Zeit noch immerhin rund 25% unseres Eigenbedarfs decken kann, sehr rasch abnehmen. Falls es nicht gelingt, die Existenz wirtschaftlich interessanter Muttergesteine unterhalb des Oberkarbons und damit auch die Voraussetzungen für Erdgasansammlungen in größerer Tiefe zu konkretisieren, wird der Industriestaat Deutschland in wenigen Jahrzehnten ohne Erdgasförderung aus heimischen Quellen und ohne die sicheren heimischen Reserven an Methan sein, obwohl die Bedeutung des Methans als wichtiger und umweltfreundlicher Energieträger und Chemierohstoff künftig zunehmen wird.

## 2. Die künftige Verfügbarkeit von Energie auf dem Weltmarkt

Zur Zeit besteht kein Problem, den Energiedarf der Bundesrepublik Deutschland auf dem internationalen Markt preisgünstig zu decken. Dies ist auch für die Zukunft zu erwarten, falls es gelingt, das System der freien Marktwirtschaft weltweit zu stabilisieren, genügend Energie auf dem Markt verfügbar zu haben und überregionale Krisen und Kriege zu verhindern. Deutschland kann und wird zu diesen Voraussetzungen partiell beitragen, kann diese jedoch kaum wirklich beeinflussen und noch weniger durchsetzen.

Die Sicherstellung des freien Welthandels und die Verhinderung überregionaler Krisen und Kriege sind Utopien, deren Voraussetzungen sich aufgrund historischer Erfahrungen rasch ändern können und die sich damit einer Prognose weitgehend entziehen. Der Bedarf an Primärenergie auf dem Weltmarkt läßt sich weitaus sicherer vorhersehen. Er ist primär an das Bevölkerungswachstum geknüpft. Nach den im wesentlichen übereinstimmenden Prognosen großer internationaler Konzerne und Institutionen wird ein weiterer Zuwachs der Weltbevölkerung eintreten, der auch bei konservativer Betrachtungsweise die Bevölkerungszahl unseres Planeten von heute knapp 6 Milliarden Menschen auf etwa 9 Milliarden im Jahr 2025 anwachsen lassen wird. Falls Maßnahmen zur Geburtenkontrolle in dem auf der Konferenz in Kairo 1994 angedachten Umfang international wirksam werden sollten, ist immer noch mit einer Bevölkerungszahl von etwa 8 Milliarden Menschen im Jahr 2025 zu rechnen (SHELL, 1995). Parallel mit dem Zuwachs der Weltbevölkerung, der überwiegend in den Ländern der Dritten Welt stattfindet, wird ein Anwachsen des Primärenergiebedarfs eintreten. Für das Jahr 2010 wird nach einer 1994 veröffentlichten Studie der OECD ein Zuwachs des weltweiten Primärenergiebedarfs um 47%, bezogen auf den Energiebedarf des Jahres 1991, prognostiziert (Fig. 2).

Wie aus der gleichen Studie hervorgeht, ist bis zum Jahr 2010 keine wesentliche Verschiebung der Anteile der verschiedenen Energieträger bei der Deckung des Primärenergiebedarfs zu erwarten (Fig. 3).

Da die Kernenergie an Akzeptanz einbüßt und alternative Energien weltweit nur langfristig entscheidende Beiträge zum Energiekonzept liefern können, müssen etwa 90%

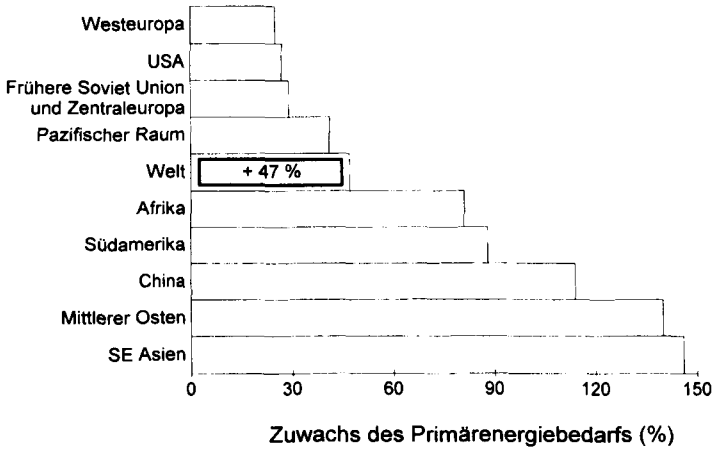


Fig. 2:  
Zuwachs des weltweiten Primärenergiebedarfs bis zum Jahr 2010.  
Bezugsgröße ist der Energiebedarf von 1991

des Energiebedarfs auch im Jahr 2010 durch fossile Energie gedeckt werden. Aus diesen Prognosen folgt, daß auch bei Offenhaltung des Welthandels und überregionalem Krisenmanagement

- einerseits bei steigendem Bedarf eine Verknappung der fossilen Energieträger auf dem Weltmarkt erwartet werden muß,
- andererseits bei überwiegender Nutzung fossiler Energie mit einem weiteren Anstieg der Kohlendioxidgehalte in der Atmosphäre zu rechnen ist.

Methan hat jedoch im Vergleich zu allen anderen fossilen Energieträgern die höchste Energieeffektivität bei geringstem Ausstoß an Kohlendioxid. Deshalb ist der Industriestaat Deutschland gut beraten, für die kommenden Jahrzehnte Vorsorge zu treffen, um einen möglichst großen Teil des Primärbedarfs an Energie mit wirtschaftlich konkurrenzfähigen und umweltfreundlichen Methan zu sichern. Die Bundesanstalt für Geowis-

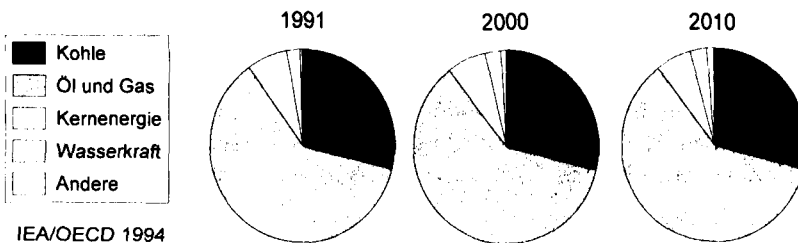


Fig. 3:  
Änderung der Anteile der Energiearten am Primärenergiebedarf

senschaften und Rohstoffe hat als Folge dieser Überlegungen ein langfristig angelegtes Forschungsprogramm, das Tiefengasprojekt, initiiert, in dessen erster Phase die Konkretisierung der Existenz von Tiefengasmuttergesteinen erreicht werden sollte.

### 3. Das Tiefengasprojekt

Das Tiefengasprojekt ist in mehrere Phasen gegliedert. Die Klärung der Frage, ob aktive Muttergesteine in bisher noch nicht explorierten Tiefen im Norddeutschen Becken auftreten, war das Hauptziel der ersten Phase des Vorhabens. In mehreren Folgephasen sollten nach einem mit dem BMBF und der Industrie bereits abgestimmten Konzept der Frage potentieller Speichergesteine nachgegangen werden, Höffigkeitsgebiete eingegrenzt und nach einer durch 3D-Seismik bestimmten regionalen Einengung eine Forschungstiefbohrung auf Tiefengas in sedimentären präwestfalen Schichten niedergebracht werden.

Die erste Phase ist nach einer Laufzeit von knapp 6 Jahren 1995 abgeschlossen worden. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover war mit der Forschungskoordination betraut und deckte, zusammen mit ihrer Außenstelle in Berlin, die Fachgebiete Geologie, Geochemie, Isotopengeochemie, Petrographie und Geophysik ab. Da die potentiellen Muttergesteine in Norddeutschland nur in großen Tiefen vorkommen, in randlichen Bereichen des Beckens aber erbohrt oder oberflächennah faßbar sind, wurden diese thermisch weniger beanspruchten Muttergesteine in das Vorhaben einbezogen. Partner für den skandinavischen Raum waren Geowissenschaftler der Universität Kopenhagen, der britische Bereich wurde von Kollegen des Trinity College in Dublin bearbeitet. Die Universitäten Hannover (Experimentelle Mineralogie), Heidelberg (Edelgase), Bochum (Schwefelisotope) und Leipzig (Theoretische Physik) waren weitere Partner in dem Forschungsverbund. Sieben große, in der Bundesrepublik explorierende Ölgesellschaften, die sich zu einem durch die Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle (DGMK) koordinierten Industriekonsortium zusammengeschlossen hatten, arbeiteten in dem Vorhaben mit. In die Finanzierung des Projekts teilten sich das Ministerium für Forschung und Technologie mit 7 Millionen DM und das Wirtschaftsministerium mit 6 Millionen DM. Die Industrie beteiligte sich durch wertvolle Beratungs- und wichtige Sachleistungen. Trotz der guten Ergebnisse der jetzt abgeschlossenen 1. Phase konnte der Beginn der nächsten Phase des Projektes wegen der Einengung der finanziellen Spielräume bei der Erdölindustrie und wegen einer übergeordneten Änderung der Förderschwerpunkte im Bereich des BMBF nicht gestartet werden. Kleinere Vorhaben mit direkt umzusetzenden Ergebnissen sollen künftig in direkter Zusammenarbeit mit der Industrie weiterverfolgt werden.



#### 4. Ziele der ersten Phase des Tiefengasprojekts

Der Nachweis der Existenz und die regionalgeologische Lokalisierung aktiver Muttergesteinen in präwestfalen Sedimentschichten (Fig. 4) als Voraussetzung für das Auftreten von Tiefengas war Hauptziel der ersten Phase des Vorhabens.

Darüber hinaus müssen geologische Situationen gefunden werden, bei denen folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

- Präwestfale Muttergesteine
- Geeignete Reife der Muttergesteine
- Migrationsbahnen vom Muttergestein zu den Fangstrukturen
- Fangstrukturen
- Abdichtende Deckschichten.

Während in der bereits abgeschlossenen 1. Phase die Frage der Muttergesteine, ihrer Reifezustände und die Existenz tieffreichender Migrationsbahnen eingehend behandelt wurden, ist der Nachweis guter Fangstrukturen (Speichergesteine, Abdichtung) noch offen.

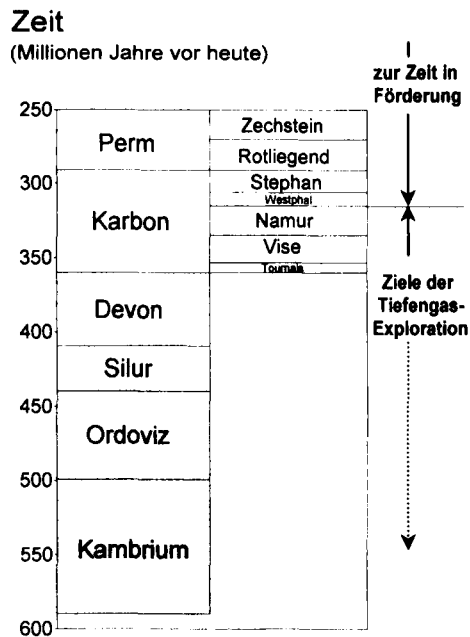


Fig. 4:  
Geologische Zeichenskala

## 5. Ergebnisse der ersten Phase

Die Ergebnisse der ersten Phase sind in umfangreichen, zunächst von der Erdölindustrie noch als vertraulich eingestuften Berichten, dokumentiert. Deshalb können zur Zeit die wichtigsten Ergebnisse aus den verschiedenen Arbeitsgebieten nur kurz und vereinfacht dargestellt werden.

Die struktureologische Auswertung vorhandener und teilweise reprozessierter Seismik ermöglichte erstmals eine beckenweite Analyse des präpermischen Untergrunds des Norddeutschen Beckens (Brückner-Röhling, S. et al., 1994).

Die magnetotellurische Messungen (Hoffmann et al., 1994) lassen in großen Tiefen die Existenz guter Leiter, möglicherweise Schwarzschiefer, erkennen. Schwarzschiefer sind häufig ausgezeichnete Muttergesteine.

Die geologischen Untersuchungen führten zu paläogeographischen Kartierungen, die klar zeigen, daß geeignete präwestfale Muttergesteine weitverbreitet sind (Bandlowa et al., 1995), insbesondere am Nordrand des Beckens. Diese Muttergesteine treten aufgrund der geologischen Situation in Britannien und Skandinavien oberflächennah auf. Sie wurden in Untersuchungen zur Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehalts präwestfaler Muttergesteine einbezogen, deren Ergebnisse in der Figur 5 dargestellt sind.

Geochemische Analysen (Everlien, 1994) zeigen, daß häufig Gehalte an organischer Substanz in dem für tonige Muttergesteine typischen Bereich zwischen 1 und 10% auftreten. Vergleicht man die Gehalte an organischem Kohlenstoff, die im Westfal, der Gas-

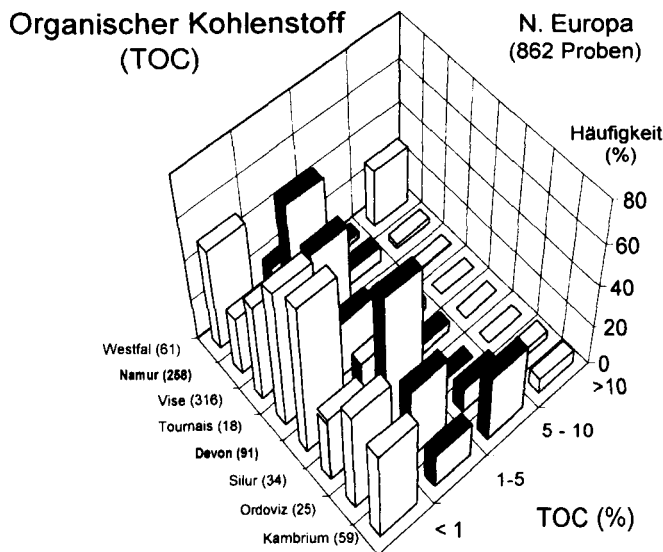


Fig. 5:

Organischer Kohlenstoff in westfalen und präwestfalen Tonsteinen

küche unserer großen Rotliegendagerstätten, auftreten, mit denen in Kohlenstoff präwestfalen Formationen vom Namur bis zum Kambrium, so sind keinesfalls geringere Mengen an organischen Kohlenstoff im Präwestfal zu beobachten. Die Menge an organischem Kohlenstoff ist kein limitierender Faktor für die Genese von Tiefengas.

Zur Beantwortung der Frage nach der Existenz aktiver Muttergesteine ist neben der Menge an organischer Substanz deren Reife sehr wichtig. Die durch die thermische Beanspruchung entstandene Reife wurde entweder durch die Absenkung der Sedimentschichten über geologische Zeiträume oder durch das Aufdringen von Intrusivkörpern verursacht. Das Ablagerungsmilieu, das den chemischen Aufbau und damit das Kohlenwasserstoffpotential der organischen Substanzen kontrolliert und für die Genese von Öl große Bedeutung hat, ist für Tiefengasmuttergesteine weniger wichtig, da bei hohen Reifen auch marine Muttersubstanzen nur noch Gas bilden können.

Im Verlauf des Vorhabens wurden an vielen potentiellen Tiefengasmuttergesteinen organopetrographische Untersuchungen (Koch 1994a, Koch 1994b) durchgeführt und die Reife über die Messung der Vitrinitreflexion  $R_O$  (%) bestimmt. So konnte einerseits ein quantitatives Regionalbild des Reifezustands geologischer Schichten im tiefen Untergrund erhalten und andererseits die für Reifemodellrechnungen notwendigen Kontrollen ermöglicht werden. Diese Arbeiten lassen erkennen, daß für präwestfale Muttergesteine in Norddeutschland mit Vitrinitreflexionen von  $2.5\% < R_O < 8\%$  zu rechnen ist. Sowohl die Erfahrungen mit produzierenden Gaslagerstätten als auch die Erkenntnisse aus Pyrolyseversuchen zeigen, daß wahrscheinlich ab etwa 3.5% Vitrinitreflexion das Ende des Gasfensters erreicht ist. Dies bedeutet, daß dann das für die Bildung von Kohlenwasserstoffen notwendige Wasserstoffpotential der organischen Substanzen erschöpft ist. Die Ergebnisse der organischen Petrographie belegen, daß viele potentielle Muttergesteine für Tiefengas in weiten Bereichen Norddeutschen Beckens überreif sind und kein Erdgas mehr bilden können, daß es aber Regionen gibt, in denen durchaus aktive Muttergesteine, d.h. Muttergesteine im Gasfenster, auftreten.

Die tiefenabhängige Temperatur, bei der das Gasfenster endet, ist für alle Überlegungen zum Auftreten übertiefer Gase eine entscheidende Größe, die aber bisher nur ungenau bekannt ist. Verlässliche Daten stammen aus Pyrolyseexperimenten, bei denen der natürliche Gasbildungsprozeß durch das Hochheizen organischer Substanzen ohne Zugabe von Wasser (Trockenpyrolyse) simuliert wurde. Tiefliegende Muttergesteine sind aber hohen thermischen Belastungen ausgesetzt, die nicht nur die organischen Substanzen, sondern auch die ohne Zweifel vorhandenen Porenfluide beeinflussen. Aufgrund dieser Überlegungen wurden im Verlauf des Tiefengasvorhabens Pyrolyseexperimente in der flüssigen Wasserphase bei Temperaturen  $T < 370^\circ$  Celsius durchgeführt. Der in Muttersubstanzen selbst bei hoher Reife noch reichlich vorhandene Wasserstoff (etwa 3 Gewichtsprozent bei  $R_{\max} = 4\%$ ) sollte unter Einwirkung von Wasser und der katalytisch aktiven Mineralsubstanz in Form von Kohlenwasserstoffen abgegeben werden können. Außerdem wurde untersucht, ob das Wasser selbst als Wasserstofflieferant in Frage kommt, wie es thermodynamische Berechnungen für möglich erscheinen lassen. Die Ergebnisse einiger Naßpyrolyse-Experimente (Everlien et al., 1993) sind in Figur 6 dargestellt.

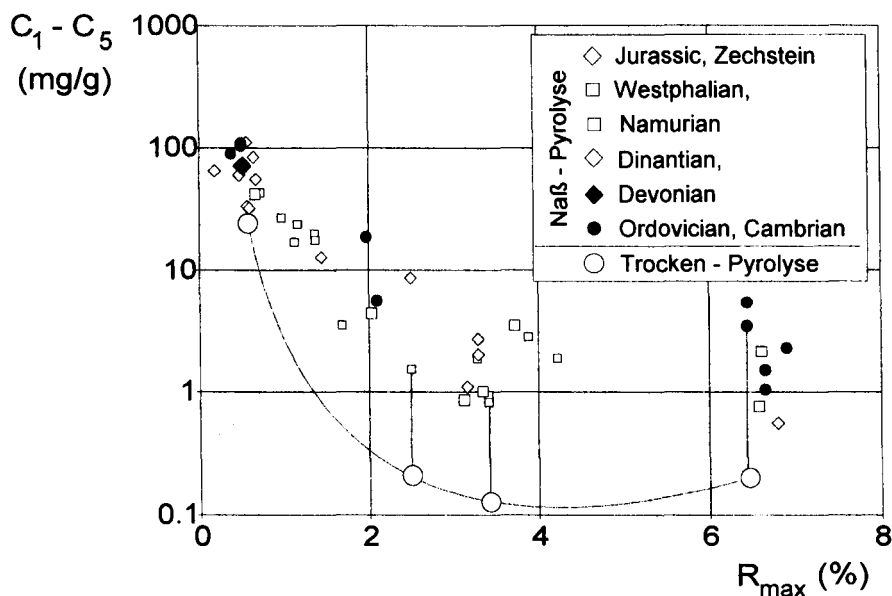


Fig. 6

Vergleich der Kohlenwasserstoffausbeuten (mg Gas / g TOC) von Muttergesteinsproben unterschiedlicher maximaler Reife ( $R_{max}$ ) bei nasser und trockener Pyrolyse

Man erkennt, daß tatsächlich die Ausbeuten bei der Naßpyrolyse um etwa eine Größenordnung höher als bei der konventionellen Trockenpyrolyse (große offene Kreise) sind. Kohlenstoff-Isotopenanalysen an dem Methan aus der Naß-Pyrolyse hochreifer Muttergesteinen zeigen  $^{12}\text{C}$ -angereicherte Kohlenstoffisotopen im Vergleich zu den Isotopenverhältnissen des Methan, das in geringerer Menge aus der Trockenpyrolyse derselben organischen Substanz gewonnen wird. Dies läßt vermuten, daß bei der Naßpyrolyse andere Reaktionsabläufe als bei der Trockenpyrolyse auftreten können. Falls sich diese Laborexperimente näherungsweise auf natürliche Systeme übertragen lassen, würde sich das Erdgasbildungspotential in Gebieten mit hochreifen Muttergesteinen drastisch erhöhen.

Methan ist in dem angesprochenen Tiefenbereich bis 10 km kinetisch stabil, wie physiko-chemische Berechnungen zeigen.

Die Frage, ob es Migrationsbahnen von tiefliegenden Muttergesteinen in oberflächen-nähere Speichergesteine gibt, konnte indirekt positiv beantwortet werden. Es konnte isotopengeochemisch nachgewiesen werden (Gerling et al., 1995), daß Helium mit einem hohen  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis in einigen der zur Zeit in Förderung befindlichen Erdgase auftritt. Das hohe  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis ist für Helium charakteristisch, das aus großen Tiefen, vermutlich dem oberen Mantel stammt. Damit ist zumindestens für He die Existenz tiefgreifender Migrationsbahnen aufgezeigt.

Ein indirekter Nachweis von Tiefengas sollte über die präzise Vermessung der Kohlenstoffisotopenverhältnisse des Methans aus allen tiefen Erdgasbohrungen der Bundesrepublik erfolgen. Die Gase stammen überwiegend von Muttergesteinen des Oberkarbons ab, aus deren bekannter Reife das Isotopenverhältnis des aus ihnen hervorgegangenen Methans gefolgert werden kann. Falls Tiefengas existiert, wird es bei offenen Migrationbahnen aus seinen tieferliegenden Muttergesteinen in die untersuchten, in Förderung befindlichen Speichergesteine einwandern, wird sich dem dort befindlichen Gas aus dem Oberkarbon zumischen und dadurch das Isotopenverhältnis des gesamten im Speicher befindlichen Methans leicht modifizieren. Derartige, außerhalb der Norm liegende systematische Verschiebungen des Kohlenstoffisotopenverhältnisses von Methan aus Lagerstätten können als Nachweis für das Eindringen von Tiefengas in die Lagerstätte gewertet werden. Indizien für solch eine Änderung der Kohlenstoffisotopen konnten an Gasen aus dem Bereich der Emsmündung erkannt werden.

## 7. Schlußfolgerungen und Ausblick

Die Zusammenschau der dargelegten Ergebnisse führt zu dem Schluß, daß ein großer Bereich der Bundesrepublik Deutschland nicht hoffig für Tiefengas ist und für weitere Untersuchungen ausgeklammert werden kann. Hohe Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten aktiver Tiefengas-Muttergesteine bestehen jedoch in gut abgrenzbaren Gebieten, wie z.B. in Teilen der Deutschen Nordsee, im Emsland und im Bereich der Emsmündung. Damit ist das Ziel der ersten Phase des Tiefengasprojekts voll erreicht worden: Es konnte der Nachweis geführt werden, daß aktive Muttergesteine für Tiefengas existieren. Die Gebiete mit einem Potential für Tiefengas konnten regional eingegrenzt und bewertet werden. Damit sind alle Voraussetzungen für detaillierte künftige Untersuchungen in regional stark eingeeengten Bereichen gegeben. Es besteht die begründete Hoffnung, daß die Bundesrepublik Deutschland in Zukunft, falls dies erforderlich werden sollte, auf die relativ umweltfreundliche Energieform „Tiefengas“ zurückgreifen kann.

## Literatur

- Bandlowa, T., Buchardt, B., Clayton, G., Gerling, P., Everlien, G., Kessel, G., Kockel, F., Krull, P., Sevastopulo, G., (1995): Prä-westfale Muttergesteine in Mittel- und Nordwesteuropa. BGR Archivbericht Nr. 112934 (unveröffentlicht)
- Brückner-Röhling, S., Hoffmann, N., Koch, J., Kockel, F., Krull, P., Stumm, M. (1994): Die Struktur-, Mächtigkeits- und Inkohlungskarten des Norddeutschen Oberkarbon- und Permbeckens und seiner Ränder, 1:500 000. BGR Archivbericht Nr. 111531 (unveröffentlicht).
- Everlien, G., (1994): Organisch geochemische und naßpyrolytische Untersuchungen an präwestfalen Muttergesteinen aus Zentral- und NW-Europa. BGR Archivbericht Nr. 112393 (unveröffentlicht).
- Everlien, G., Gerling, P., Koch, J., Wehner, H. (1993): Hydrous pyrolysis of paleo-coal coals and coal shales. 7th Int. Conf. on Coal Science, Banff, Conf. Proc., Vol. II, 409-412. ISBN 0-9697498-0-7

- Gerling, P., Mittag-Brendel, E., Sohns, E., Wehner, H., (1996): Genese und Verteilungsmuster der Erdgase im Norddeutschen Becken. BGR Archivbericht in Bearbeitung.
- Hoffmann, N., Fluche, B., Müller, W. (1994): Erste Ergebnisse von magnetotellurischen Messungen in Norddeutschland. Ein Statusbericht: 15. Kolloquium Elektromagnetischer Tiefensondierung. Höchst/Odenwald.
- Koch, J. (1994a): Organisch petrographische Untersuchungen am Kupferschiefer Norddeutschlands. BGR Archivbericht Nr: 112310
- Koch, J. (1994b): Die mittlere Vitritreflexion ( $R_p$ ) in Abhängigkeit von der Teufe in Norddeutschland. BGR Archivbericht Nr: 112527
- SHELL (1995): Energie im 21. Jahrhundert. Aktuelle Wirtschaftsanalysen 5 / Heft 25, Deutsche Shell Aktiengesellschaft

EGON RICHTER, Braunschweig

## Über die partiellen Differentialgleichungen des magnetohydrostatischen Gleichgewichts

Braunschweig, 13. Oktober 1995\*

In der Magnetohydrodynamik wird das statische Gleichgewicht eines Plasmas mit dem Druck  $p$  in einem Magnetfeld  $\mathbf{B}$  durch ein System quasilinearer partieller Differentialgleichungen beschrieben:

$$(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} = \nabla p, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0.$$

Exakte Lösungen dieser Gleichungen konnten bisher nur unter speziellen Annahmen hergeleitet werden.

Im folgenden wird eine auf SOPHUS LIE zurückgehende Lösungsmethode benutzt, die zu einer Symmetriereduktion des Differentialgleichungssystems führt und schließlich die Berechnung von Ähnlichkeitslösungen ermöglicht. Bei diesem Verfahren muß zuerst die Lie-Symmetriegruppe des Systems bestimmt werden. Transformationen der unabhängigen und abhängigen Variablen eines Differentialgleichungssystems, die Lösungen des Systems auf (im allgemeinen andere) Lösungen desselben Systems abbilden, heißen Symmetrietransformationen des Differentialgleichungssystems. Für die auszuführenden Berechnungen ist von entscheidender Bedeutung, daß es genügt, anstelle der Lie-Symmetriegruppe  $G$  zunächst die ihr zugeordnete Lie-Algebra  $\mathcal{G}$  für das System zu bestimmen. Dies geschieht durch Berechnung der infinitesimalen Generatoren. Für die magnetohydrostatischen Gleichungen ergibt sich eine neundimensionale Lie-Algebra  $\mathcal{G}$ , deren Basiselemente neun einparametrische Transformationsgruppen erzeugen: drei räumliche Translationen, drei räumliche Drehungen, eine räumliche Skalierung, eine Feldskalierung und eine Translation des Druckes. Mit Hilfe dieser einparametrischen Gruppen kann jedes Element der vollständigen (zusammenhängenden lokalen) Lie-Symmetriegruppe  $G$  des Systems erzeugt werden.

Wenn verlangt wird, daß die Elemente einer Untergruppe  $H$  der Lie-Symmetriegruppe  $G$  eine Lösung des Differentialgleichungssystems auf *dieselbe* Lösung des Systems abbilden, heißt die Lösung  $H$ -invariant oder Ähnlichkeitslösung bezüglich  $H \subset G$ . Unter geeigneten, häufig erfüllten Voraussetzungen können diverse Ähnlichkeitslösungen aus Systemen *gewöhnlicher* Differentialgleichungen berechnet werden, die aus dem ursprünglich gegebenen System *partieller* Differentialgleichungen herleitbar sind. Das magnetohydrostatische Gleichungssystem mit drei unabhängigen Variablen läßt sich auf gewöhnliche Differentialgleichungssysteme reduzieren, wenn Ähnlichkeitslösungen bezüglich zweiparametrischer Untergruppen von  $G$  diskutiert werden.

---

\* Zusammenfassung eines Vortrags vor der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Die Klassifikation der Ähnlichkeitslösungen eines partiellen Differentialgleichungssystems läßt sich zurückführen auf eine Klassenbildung in  $G$ , die konjugierte Untergruppen  $H \subset G$  benutzt. Symmetrietransformationen, die zu konjugierten Untergruppen gehören, liefern sogenannte *nicht wesentlich* verschiedene Ähnlichkeitslösungen. Da die Menge aller Untergruppen von  $G$  in disjunkte Klassen paarweise konjugierter Untergruppen zerfällt, genügt es, für die *wesentlich* verschiedenen Ähnlichkeitslösungen Listen von paarweise nicht konjugierten Repräsentanten der Klassen zueinander konjugierter Untergruppen von  $G$  anzulegen. Derartige Listen heißen Optimalsysteme. Diese Klasseneinteilung wird zweckmäßigerweise zunächst für die in analoger Weise definierbaren Optimalsysteme der zu  $G$  gehörenden Lie-Algebra  $\mathcal{G}$  ausgeführt. Für das magnetohydrostatische Gleichungssystem kann ein Optimalsystem mit 13 zweidimensionalen Unterálgebren von  $\mathcal{G}$  angegeben werden, aus dem sich 13 verschiedene gewöhnliche Differentialgleichungssysteme ergeben. Einige Lösungen dieser reduzierten Gleichungen liefern physikalisch interessante Ähnlichkeitslösungen der magnetohydrostatischen Gleichungen.

Eine ausführliche Darstellung der vorgetragenen Ergebnisse erscheint in den Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, Band XLVI, 1995.



VOLKMAR KOSE, Braunschweig

## Neue Entwicklungen in der Meßtechnik

Braunschweig, 10.2.1995\*

In unserer modernen Gesellschaft, die durch die Fortschritte in den Naturwissenschaften, der Technik und durch weltweiten Handel geschaffen worden ist, hat das Messen eine herausragende Bedeutung. Jede Ware in kleinen oder riesigen Mengen, die ihren Besitzer wechselt – ob Lebensmittel oder elektrische Energie – muß gemessen werden. Selbst der Arzt stützt sich bei der Diagnose oder der Therapie auf Meßwerte, die Aussagen über unseren gesundheitlichen Zustand machen oder die Dosis festsetzen. Das Messen ist also zu einem ganz normalen Bestandteil unseres Lebens geworden.

Die erhöhten Anforderungen an Genauigkeit insbesondere im „High-Tech“-Bereich und an die Vergleichbarkeit von Messungen setzen genaue und allgemein gültige Einheiten voraus. Um diesen beiden Ansprüchen gerecht werden zu können, versucht man heute die Einheiten auf Fundamentalkonstanten in der Physik zurückzuführen. Soweit wir wissen, sind diese nämlich als unabhängig vom Ort und von der Zeit anzusehen und stellen, wenn immer das in der Praxis mit geringer Meßunsicherheit gelingt, ideale Maße in Naturwissenschaft und Technik dar.

Bekanntlich beruhen alle Messungen in unserem SI-Einheitensystem auf sieben Basiseinheiten, die in dem Bild 1 wiedergegeben sind. Die drei unabhängigen Basiseinheiten Kilogramm, Sekunde und Kelvin werden durch das Kilogramm-Prototyp seit 1889, seit 1967 durch die Atomuhr und durch die Tripelpunktzelle des Wasser in den metrologischen Staatsinstituten dargestellt. Relativ neu sind die Versuche, das Meter, das Mol und das Ampère auf Fundamentalkonstanten zurückzuführen. Im folgenden soll kurz über den gegenwärtigen Stand dieser Entwicklung berichtet werden.

### 1. Realisierung des Meter durch Frequenzmessung sichtbarer Laserstrahlung

Die Einheit des Meter war ursprünglich vom Umfang der Erde abgeleitet worden als der zehnmillionste Teil eines Erdmeridian-Quadranten. Die Verkörperung dieser Einheit geschah 1889 durch einen Meter-Prototyp aus Platin-Iridium. Unsere heutige gültige Meter-Definition wurde 1983 beschlossen. Seit dieser Zeit ist das Meter durch die Länge der Strecke definiert, die Licht im Vakuum während der Dauer von  $(1/299\,792\,458)$  Sekunden durchläuft. Sie ist also mit der Definition der Zeit verknüpft. Gleichzeitig ist der

---

\* Zusammenfassung eines Vortrags vor der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

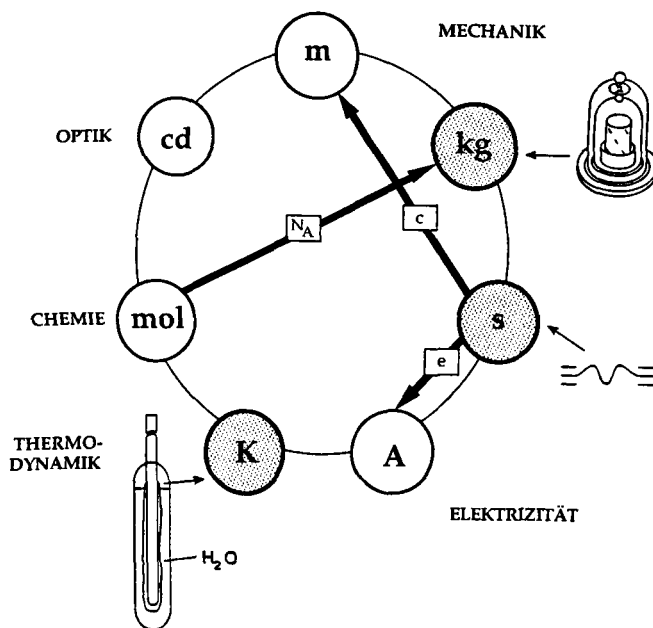


Bild 1:

Die sieben Basiseinheiten Meter (m), Kilogramm (kg), Sekunde (s), Ampère (A), Kelvin (K), Mol (mol) und Candela (cd) des internationalen Einheitensystems für Länge, Masse, Zeit, elektrische Stromstärke, Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke. Drei Basiseinheiten kg, s, K sind von den anderen Einheiten meßtechnisch unabhängig. Darüber hinaus sind einige Anwendungsfelder aufgeführt, für die bestimmte Basiseinheiten wichtig sind. Die drei Fundamentalkonstanten Lichtgeschwindigkeit  $c$ , Avogadrokonstante  $N_A$  und die elektrische Elementarladung  $e$  sind heute von zentraler Bedeutung für die Realisierung des Meter, Mol und des Ampère.

Wert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zu  $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ , d. h. ohne Unsicherheit, festgelegt.

Nach dieser Definition der Längeneinheit können Entfernungen zwischen zwei Meßpunkten mit Hilfe der Zeit bestimmt werden, in der das Licht von einem Punkt zum anderen läuft. Derartige Zeitmessungen eignen sich für große Entfernungen, z. B. zwischen Erde und Mond. Für genaue Messungen im Laboratorium hingegen verwendet man interferentielle Methoden, bei denen die zu messende Länge mit der bekannten Wellenlänge  $\lambda$  eines Lasers mit sichtbarer Strahlung verglichen wird. Einer zu messenden Länge von 10 mm entsprechen dann 20 000 Wellenlängen, wenn  $\lambda = 0,5\text{ }\mu\text{m}$  beträgt.

Um makroskopische Längen in Vielfachen von  $\lambda$  genau messen zu können, bedarf es einer genauen Kenntnis des  $\lambda$ -Wertes. Dies ist kürzlich in der PTB mit einer relativen Unsicherheit von kleiner  $10^{-12}$  gelungen. Wegen des definierten Wertes der Lichtgeschwindigkeit bedeutet eine Wellenlängenmessung praktisch eine Frequenzmessung der Laserstrahlung. Um das Meter gemäß Bild 1 auf die Sekunde zurückzuführen, muß die

Atomuhrenfrequenz ( $\approx 9$  GHz) mit der Frequenz der Laserstrahlung ( $\approx 450\,000$  GHz) genau bestimmt werden. Gegenüber früheren Messungen konnte erstmals dieses Frequenzverhältnis von 50 000 durch phasenstarre Frequenzvervielfachung fehlerlos gemessen werden. Damit läßt sich heute das Meter gegenüber früheren Messungen mindestens 50mal genauer realisieren und erreicht damit die Unsicherheit der Sekunde.

## 2. Realisierung des Kilogramms auf der Grundlage der Avogadrokonstanten

Die Definition der Einheit der Masse gilt seit 1889 unverändert bis auf den heutigen Tag. Sorgfältig aufbewahrt im Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Sèvres bei Paris befindet sich das Urkilogramm, das per definitionem die Unsicherheit Null hat. Alle nationalen Kilogramm-Prototype werden durch genaue Wägungen periodisch etwa alle 30 Jahre an das Urkilogramm angeschlossen. Gasan- und -einlagerungen führen mit der Zeit zu Veränderungen des Kilogramm, die bis zu 50 Millionstel Gramm ( $50\,\mu\text{g}$ ) betragen können. Dies ist sicher eine unbefriedigende Situation, die man im Begriff ist zu beseitigen.

Ziel der längerfristigen Bemühungen ist es, das Kilogramm gemäß Bild 1 auf Fundamentalkonstanten, d. h. über die Avogadrokonstante, zurückzuführen. Ohne auf die diffizilen Präzisionsmessungen einzugehen, soll hier nur der Grundgedanke erläutert werden.

Die Basiseinheit mol ist definiert als die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensoviel Einzelteilchen besteht wie Atome in 12 g des Kohlenstoffnuklids  $^{12}\text{C}$  enthalten sind. D. h., daß gerade die in einem Mol befindliche Anzahl (entspricht der Zahl der Avogadrokonstante  $N_A$ ) von Kohlenstoffatomen der Masse  $m_c$  benötigt werden, um eine makroskopische Masse von  $M = 12$  g durch Wägung zu erzielen. Die Avogadrokonstante  $N_A$  sagt also aus, wieviel Atome sich in einem makroskopischen Volumen, dem Molvolumen, befinden. Das Meßproblem besteht darin,  $N_A$  auf relativ  $10^{-8}$  oder sogar noch besser zu bestimmen.

In Bild 2 ist im Prinzip skizziert, wie die neue Darstellung des Kilogramm verwirklicht werden soll. Als Ausgangsmaterial nimmt man aus technologischen Gründen nicht Kohlenstoff, sondern Silicium, das extrem rein und in einkristalliner Form herstellbar ist. Da das Siliciumatom schwerer als das Kohlenstoffatom ist, ergibt sich für das Molvolumen eine Masse von  $M = 28$  g. Die Aufgabe besteht nun darin, die Anzahl der Si-Atome eines Einkristalls genau zu ermitteln, der 28 g wiegt, um  $N_A$  zu erhalten. Selbst wenn es möglich wäre, ist eine Zählung einzelner Atome völlig auszuschließen, da sie nur in riesigen Zeitspannen zu bewältigen ist. Um jedoch in kürzeren Zeiten mit hoher Genauigkeit zum Ziel zu kommen, vermißt man zunächst das Volumen der Elementarzelle, d. h. den Gitterabstand der Siliciumatome und kennt damit die Anzahl der Si-Atome in diesem genau bekannten Elementarzellen-Volumen. Das bedeutet, daß ein Atomabstand in der Größenordnung von einem Milliardstel Meter (1 nm) auf mindestens 8 Stellen genau gemessen werden muß! Mißt man das gesamte Volumen (Molvolumen) des Siliciumein-

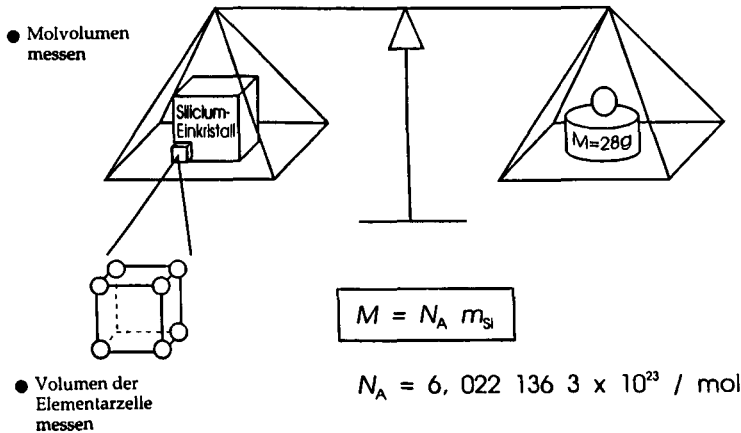


Abb. 2:  
Neue Realisierung der Einheit Kilogramm

kristalls der Kantenlänge von etwa 10 cm ebenfalls auf mindestens 8 Stellen, d. h. auf  $10^{-17}$  m, genau, so läßt sich bei regulärem Gitteraufbau ohne Fehlstellen und Verunreinigungen aus dem Volumenverhältnis von Molvolumen zu Elementarzellen-Volumen die Anzahl der Siliciumatome, d. h. die Avogadrokonstante ermitteln. Bisherige Ergebnisse, u. a. auch in der PTB, lassen in Kürze für die  $N_A$ -Bestimmung eine relative Unsicherheit von  $1 \times 10^{-7}$  erwarten, eine Größenordnung noch zu groß von dem gesteckten Ziel.

Sollte jedoch auf diesem Wege eines Tages eine weitere Steigerung der Meßgenauigkeit möglich sein, so würde das bisher gültige Artefakt Kilogramm-Prototyp durch einen Siliciumkörper bekannter Anzahl von Siliciumatomen ersetzt werden. Das Kilogramm würde somit auf atomarer Masse des Siliciums via Avogadrokonstante, d. h. dem Konversionsfaktor zwischen mikroskopischer und makroskopischer Materie, zurückgeführt sein. Dies wäre wahrlich ein meßtechnischer Meilenstein nach über 100 Jahren!

Sollte dies gelingen, so würden damit gleichzeitig erhebliche Fortschritte in Physik, Chemie und Technik erzielt sein. Das betrifft u. a. die Herstellung und Charakterisierung noch reineren Siliciums, die Rückführung in der Chemie auf SI-Einheiten, die Längenmessung an Normalen im Subnanometerbereich und die Bestimmung anderer Fundamentalkonstanten wie der Feinstrukturkonstanten auf der Basis der Avogadrokonstanten.

### 3. Realisierung des Ampère auf der Grundlage der Elementarladung des Elektrons

Bekanntlich führen bewegte elektrische Ladungen zu elektrischen Strömen. Normalerweise basieren elektrische Ströme auf einer Vielzahl von bewegten Elektronen und damit einer Vielzahl von transportierten elektrischen Ladungen. Um jedoch einen elek-

trischen Strom genauer Stromstärke  $I$  zu erzielen, muß man die Anzahl der transportierten Ladungen pro Zeit kennen. Dabei geht man neuerdings von nur einem Elektron mit der Elementarladung  $e$  ( $e = 1,6 \times 10^{-19}$  As) aus und transferiert es im Takte einer bekannten Frequenz  $f$ . Das Experiment muß nun so präpariert sein, daß dieser Transfer der einzige Vorgang für das Elektron mit der Ladung  $e$  ist. Dann läßt sich in der Tat eine elektrische Stromstärke über eine Fundamentalkonstante der Elementarladung  $e$  auf eine Frequenz der Atomuhr zurückführen gemäß  $I = ef$  (siehe Bild 1).

Verwirklichen läßt sich dies durch einen elektrischen Kondensator, dessen Plattenabstand nur wenige Atomlagen groß ist. Durch Anlegen einer Wechselspannung bekannter Frequenz läßt sich somit ein kleiner Gleichstrom durch Tunnelung eines Elektrons genau erzeugen. Voraussetzung für diesen kohärenten Ladungstransfer ist es u. a., daß durch zu hohe Temperatur des Kondensators kein zusätzlicher Ladungsübergang im Kondensator erfolgt. Will man diesen Effekt ausschalten, so läßt sich das Experiment nur sinnvoll verwirklichen, wenn die Abmessungen der Kondensatorplatten einige Nanometer ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) betragen und die Temperatur bei einem Wert von 0,05 K, also in der Nähe des absoluten Nullpunktes, liegt.

Zur Zeit lassen sich mit derartigen Anordnungen elektrische Stromstärken von lediglich 10 pA, d. h. 10 billionstel Ampère, auf relativ  $10^{-5}$  erzeugen. Ziel weiterer Untersuchungen ist es, den Strom wesentlich, d. h. auf etwa 1 A zu steigern, so daß relative Unsicherheiten von kleiner  $10^{-8}$  möglich sein sollten. Zumal ein Tunnelement nur einen geringen Platzbedarf benötigt, besteht die Möglichkeit, eine Vielzahl von Tunnelementen parallel zu schalten, um dem angestrebten Ziel näher zu kommen. Derartige Untersuchungen, die u. a. auch in der PTB durchgeführt werden, setzen voraus, daß man die erforderliche Nanolithographie zur reproduzierten Herstellung solcher kleinsten Tunnelemente beherrscht.

Abschließend läßt sich feststellen, daß die beschriebenen Experimente, bei denen Einheiten im Meßwesen durch Rückführung auf Fundamentalkonstanten gekennzeichnet sind, die Metrologie, die Wissenschaft vom Messen, erheblich bereichern werden. Darüber hinaus werden sie in Physik und Technik zu neuen Erkenntnissen führen.

---

Prof. Dr. V. Kose  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100 · 38116 Braunschweig



HARALD ZENNER, Clausthal-Zellerfeld

## **Werkstoffermüdung – wissenschaftliche und technische Aspekte**

Braunschweig, 10. November 1995\*

### **1. Bedeutung der Werkstoffermüdung**

Gebrauchsgegenstände, Bauteile, Strukturen, Fahrzeuge und Maschinenanlagen haben eine begrenzte Lebensdauer, was im Bewußtsein der Leute allgemein akzeptiert wird. Zu einer Begrenzung der Lebensdauer können unterschiedliche Prozesse führen, wie Korrosion (volkswirtschaftlich am wichtigsten), Verschleiß, Werkstoffermüdung, Kriechen, Überlastung und Alterung. Diese Prozesse können auch gleichzeitig auftreten. Das Kriterium dafür, daß die Grenze der Lebensdauer erreicht ist, ist die Nichterfüllung bzw. Beeinträchtigung der Funktion (Bruch, Anriß, bleibende Verformung) oder eine mögliche Gefährdung aufgrund verminderter Sicherheit (Anriß).

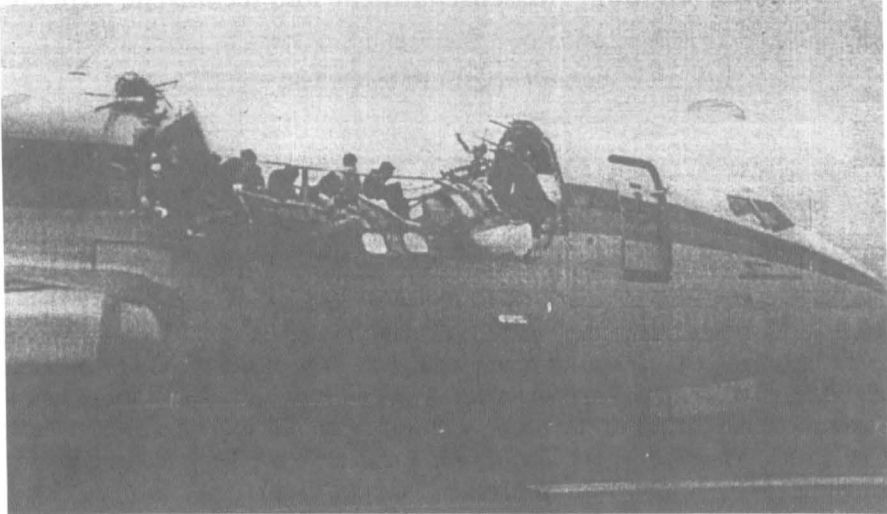
Für Schäden, die aufgrund von Ermüdung stehen, ist es z.B. im Gegensatz zu Korrosionsschäden (Ausnahme Spannungsrißkorrosion) charakteristisch, daß sie ohne Vorwarnung auftreten und zu katastrophenartigem Versagen führen können. Spektakulär waren z.B. zwei Abstürze der De-Havilland Comet, 1954, des ersten Verkehrsflugzeuges mit Strahltrieb, der Untergang der Bohrplattform Alexander L. Kielland, 1980, und die Bruchlandung einer Boing 737 der Aloha Airlines, 1988, Bild 1. Schäden dieser Art lösen stets eine rege Forschungsarbeit aus. Das Bersten der Flugzelle im letzten Beispiel erfolgte trotz der im Flugzeugbau angewandten fail safe-Auslegungsphilosophie, die ein ausfallsicheres Versagen durch mehrere Lastpfade und die Verwendung schadens-toleranter Werkstoffe erreichen will. Nach langer Lebensdauer können in einer Struktur, hier Nietlöcher, Anrisse entstehen. Die Auswirkung einer großen Zahl von Anrissen, multi site damage, auf das Strukturverhalten war bisher nicht ausreichend berücksichtigt worden.

Das Fachgebiet, das sich mit der Auslegung von Komponenten gegen Ausfall durch Ermüdung befaßt, ist die Betriebsfestigkeit. Nur selten geht es darum, Komponenten dauerhaft auszulegen, d.h. für eine beliebig lange Zeit. Vielmehr ist das Ziel der Betriebsfestigkeit die sichere und ökonomische Auslegung für eine begrenzte Nutzungsdauer. Im Mittelpunkt dieses Fachgebietes steht die Forderung nach Leichtbau, um

- die Funktion zu erfüllen (z.B. Fliegen beim Flugzeug),
- die Nutzlast zu erhöhen (z.B. Nutzfahrzeug, da das Gesamtgewicht gesetzlich festgelegt ist),

---

\* Zusammenfassung eines Vortrages vor der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigschen Wissenschaftlichen Gesellschaft.



*Bild 1:  
Gelandete Boeing 737 der Aloha Airlines*

- den Energieverbrauch (Treibstoff) zu vermindern (z.B. Pkw beim Bremsen und Beschleunigen im Stadtverkehr),
- Werkstoff einzusparen (z.B. im Anlagenbau).

Die Idee der Betriebsfestigkeit stammt aus dem Flugzeugbau (Ernst Gaßner, 1938). Sie hat in den vergangenen Jahrzehnten im gesamten Fahrzeugbau große Bedeutung erlangt und wird heute z.B. auch im Behälterbau und im Schwermaschinenbau angewendet.

## **2. Ermüdung des Werkstoffes**

An einem einfachen Beispiel, wie dem wiederholten Hin- und Herbiegen eines Drahtes, läßt sich das Ergebnis der Ermüdung zeigen: Der Draht wird bei ausreichendem Ausschlag der Biegung nach einer bestimmten Anzahl von Wiederholungen brechen. Hieraus ergeben sich grundlegende Erkenntnisse:

- Der Werkstoff kann bei Beanspruchungen versagen, die weit unter der statischen Festigkeit liegen, wenn diese wiederholt auftreten und
- das Versagen wird um so schneller erfolgen, je größer die Amplitude der Beanspruchung ist.

Dieser Vorgang ist reproduzierbar, d.h. gleiche Proben werden bei einer gleichen Folge von Beanspruchungen, von einer „natürlichen“ Streuung im Versuch einmal abgesehen, nach der gleichen Schwingenspielzahl brechen. Wie diese Schädigung und Akkumulation von Schädigungen genau abläuft, ist Gegenstand jahrzehntelanger Forschung.



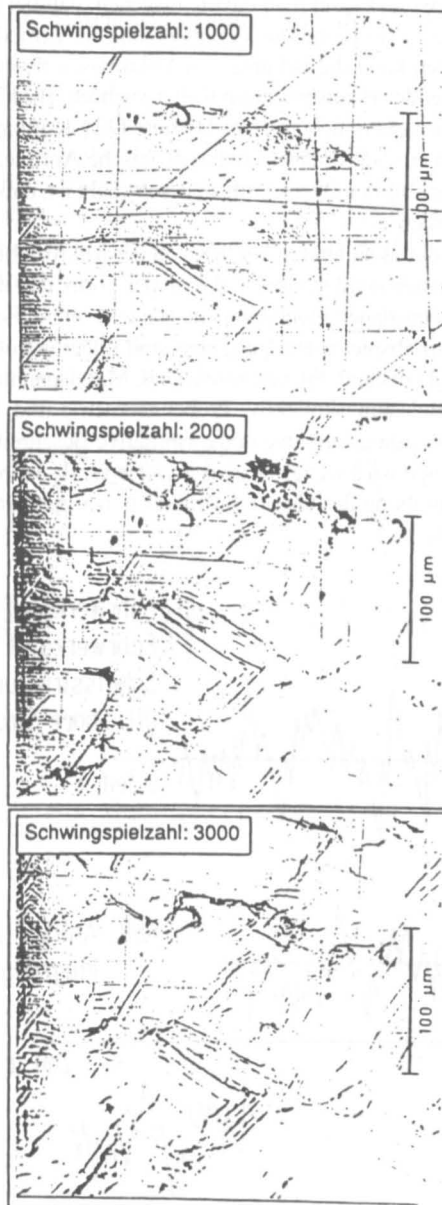


Bild 2:  
Mikrorißentstehung und -wachstum Stahl CK 15,  
Biegung und Torsion, phasenverschoben

Nach heutigem Wissensstand kann man davon ausgehen, daß bei duktilen Werkstoffen eine (mikro-)plastische Verformung die Voraussetzung für Ermüdung ist. Bereits nach wenigen Schwingspielen kann die Bildung von Mikrorissen beobachtet werden. Diese können unter schwingender Beanspruchung weiterwachsen, Bild 2, und sich verbinden (Koaleszenz), sie können aber auch an einer Barriere (z.B. Korngrenze) stehen bleiben. Schließlich bilden sich ein oder mehrere makroskopische Anrisse, die stabil fortschreiten, sich ggf. vereinigen, bis der Querschnitt so geschwächt ist, daß instabiles Rißwachstum auftritt, d.h. der Bruch.

Eine Beschreibung der ablaufenden Stadien von der Mikrorißbildung bis zum Bruch ist bisher noch nicht ausreichend gelungen, d.h. in der Form, daß daraus eine werkstoffkundlich fundierte Lebensdauerberechnung für Bauteile unter Betriebsbeanspruchung möglich wäre. Die sich abspielenden Vorgänge sind außerordentlich komplex, wobei neben Werkstoffart und -zustand, Spannungszustand, Mittelspannung, Beanspruchungsart, Belastungsfolge, Belastungskollektiv, Probengeometrie und Temperatur wesentliche Einflußgrößen sind. Eine qualitative und quantitative Beschreibung der beobachtbaren Schädigungsvorgänge wird weiter Gegenstand der Werkstoffforschung bleiben, wobei das Ziel der Beschreibung des Gesamtprozesses höher zu werten ist als das Auffinden spezifischer Details.

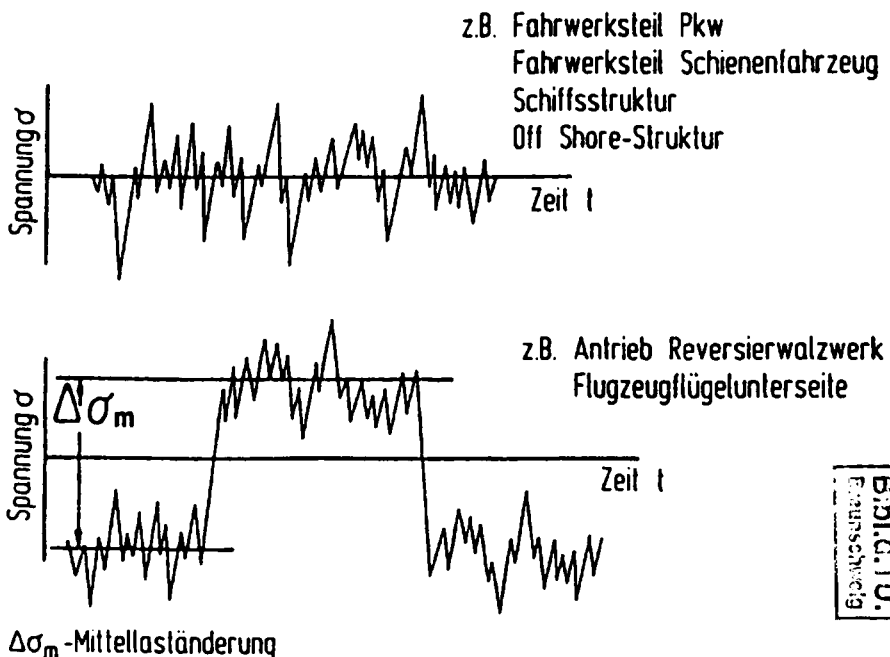
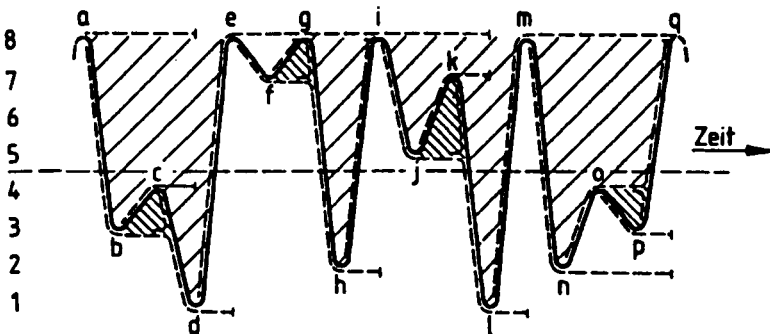


Bild 3:  
Charakteristische Beanspruchungszeitfunktionen bei Betriebsbeanspruchung

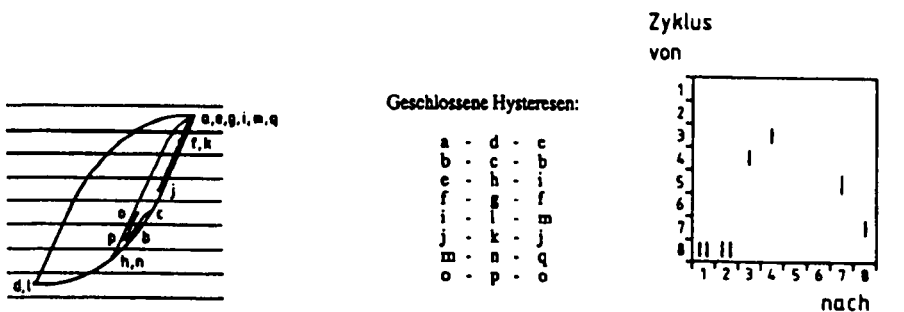
### 3. Betriebslasten und Lastannahme

Bauteilbeanspruchungen sind, wie Betriebsmessungen zeigen, in der Regel zeitlich veränderlich. Typisch sind Zufallsfunktionen (Random), wie sie bei Flugzeugen durch Böen, bei Straßenfahrzeugen durch die Fahrbahn und bei Schiffen durch Seegang entstehen, Bild 3. Charakteristisch können quasistatische Mittellaständerungen sein.

Um diese Betriebsbelastungen, d.h. Beanspruchungszeitfunktionen mit veränderlicher Amplitude, für eine Lebensdauerabschätzung nutzbar zu machen, erfolgt unter Informationsverlust (Reihenfolge, Frequenz, Schwingungsform) eine Transformation in den Häufigkeitsbereich (Häufigkeitsverteilung der Amplituden). Als Zählverfahren für diese Klassierung der Beanspruchungszeitfunktion wird heute das rainflow counting verwendet, Bild 4. Gezählt werden die geschlossenen Hysteresen, die sich in einem



Schraffierte Flächen sind Hysteresen



Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Rainflow-Matrix

Bild 4:  
Rainflow-Zählung einer Beanspruchungszeitfunktion

Spannungs-Dehnungs-Diagramm für eine bestimmte Beanspruchungszeitfunktion ergeben. Damit wird mit der Hysterese, die eine irreversible Arbeit darstellt, eine Verbindung zur Werkstoffschädigung hergestellt. Die Darstellung der Zählergebnisse erfolgt in einem Belastungskollektiv bzw. in einer Häufigkeitsmatrix.

Die Lastannahme zur Bemessung von Bauteilen, d.h. die Festlegung eines Bemessungskollektivs, ist bei vielen Anwendungen eine außerordentlich schwierige Aufgabe, einmal, weil z.B. bei Neukonstruktionen über die Beanspruchungen im Betrieb keine Erfahrungen vorliegen, zum anderen, weil die Einsatzbedingungen außerordentlich vielseitig sein können. Man denke zum Beispiel an einen Automobiltyp, der millionenfach weltweit zur Auslieferung kommt.

#### 4. Lebensdauerberechnung

Die rechnerische Lebensdauerabschätzung wird in der gegenwärtigen Situation, in der die Entwicklungszeiten mehr und mehr verkürzt werden, immer wichtiger. Grundsätzlich stehen drei Konzepte zur Verfügung:

- das Nennspannungskonzept (Lebensdauer bis Anriß oder Bruch)
- das Örtliche Konzept (Lebensdauer bis Anriß) und
- das Bruchmechanikkonzept (stabiler Rißfortschritt).

Die Treffsicherheit dieser Lebensdauerkonzepte und zahlreicher entwickelter Modifikationen ist bisher nicht befriedigend. Ein typisches Beispiel für den Vergleich zwischen berechneter und experimentell an Probestäben bestimmter Lebensdauer zeigt Bild 5. Im großen und ganzen ist bekannt, wo besondere Schwierigkeiten bei der Lebensdauerberechnung auftreten, so beim Erfassen von Einflüssen der Beanspruchungsreihenfolge, von Mittellastveränderungen, von Überlasten und vor allem bei zusammengesetzter Beanspruchung (zeitlich veränderlicher mehrachsiger Spannungszustand mit zeitlich veränderlicher Hauptspannungsrichtung). Hier besteht für die Zukunft wesentlicher Forschungsbedarf. In der Praxis behilft man sich häufig durch Anpassung der Rechnung an Versuchsergebnisse innerhalb eines begrenzten Anwendungsbereichs, d.h. durch eine sog. relative Lebensdauerabschätzung.

#### 5. Historisches

Ermüdungsschäden sind seit langem bekannt. Sie traten bereits bei Postkutschen auf und vor allem bei den ersten Eisenbahnfahrten, verbunden mit hohen Verlusten an Menschenleben. In etwa zwölfjähriger Arbeit (Veröffentlichungen zwischen 1858 und 1870) hat August Wöhler bei der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn zu Frankfurt a.d. Oder methodisch Schwingversuche an Eisenbahnnachsen durchgeführt, die zu wesentlichen Erkenntnissen, wie dem schädlichen Einfluß von Kerben auf die Schwingfestigkeit, geführt haben.

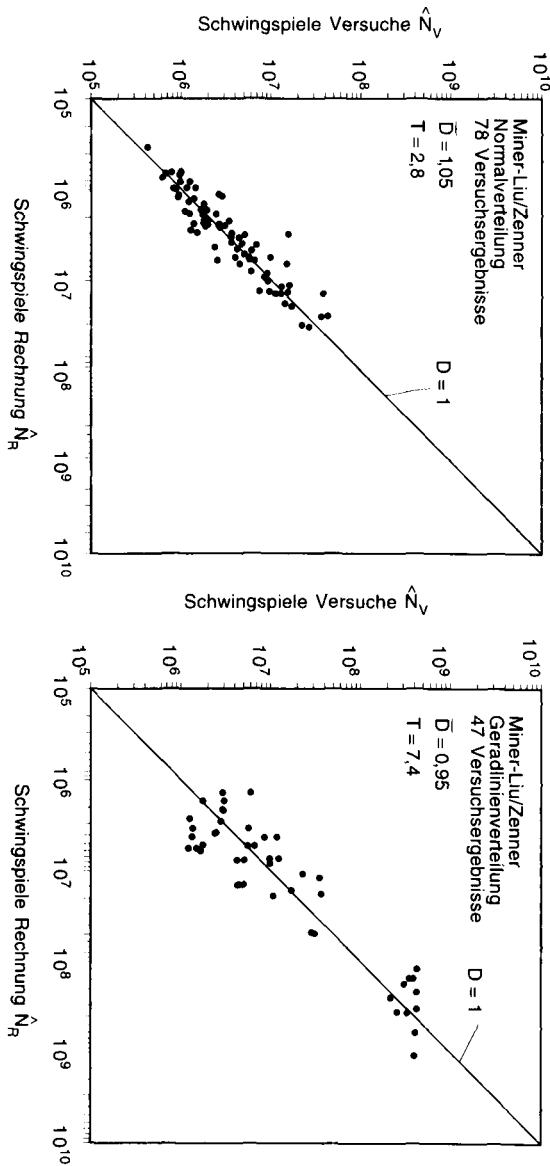


Bild 5:  
Vergleich zwischen berechneter Lebensdauer  $\hat{N}_R$  und Lebensdauer im Versuch  $\hat{N}_V$   
nach einer Modifikation von Liu und Zenner für Zufallsbeanspruchungen

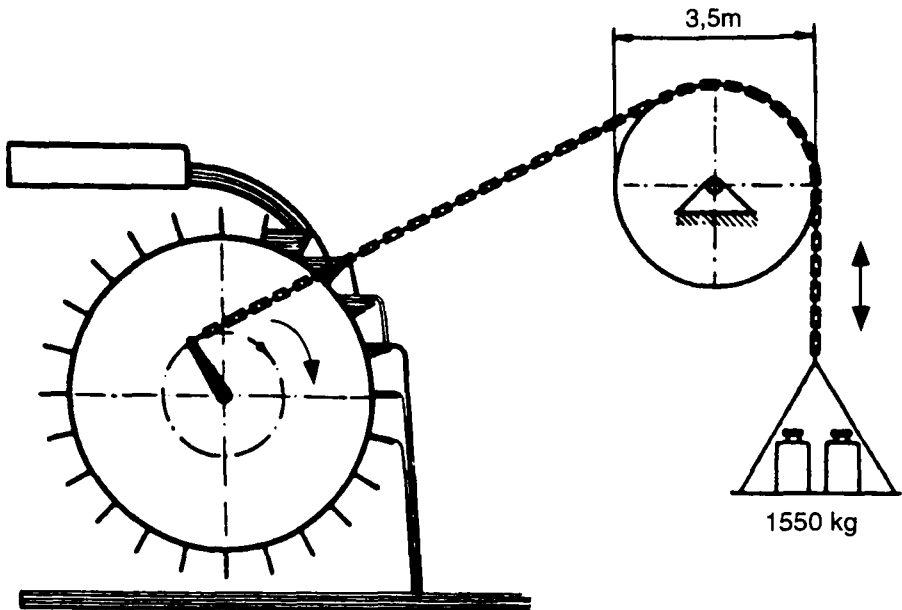


Bild 6:

*Julius Alberts Dauerprüfeinrichtung von Ketten, schematisch (ca. 1829).*

*Die Beanspruchung der Kettenglieder erfolgt vor allem durch Biegung über die Seiltrommel.*

Für die Region Braunschweig mag es interessant sein, daß nach heutigem Wissen die ersten Ermüdungsversuche überhaupt im Oberharz durchgeführt worden sind. Infolge der immer tiefer gehenden Schächte war die Haltbarkeit der „Eisenseile“, nach heutiger Terminologie der „Eisenketten“, nicht ausreichend, was zu zahlreichen Schäden führte. Julius Albert, Oberbergrat zu Clausthal, führte daraufhin Versuche an Ketten durch, bei denen die im Betrieb auftretenden Beanspruchungsverhältnisse genau reproduziert wurden, Bild 6. Die wesentliche Beanspruchung der Kettenglieder erfolgt durch Biegung beim Umlauf über die Seiltrommel. Wesentlich war, daß er der Größe und Häufigkeit der Belastungen besondere Aufmerksamkeit schenkte, Bild 7. Albert berichtete selbst über diese Versuche, die Ende der 20er Jahre des vorigen Jahrhunderts durchgeführt worden sind („Die Bergwerks-Verwaltung des Hannoverschen Ober-Harzes in den Jahren 1831–1836“). Interessant ist, daß die Ergebnisse dieser Untersuchungen zu der Aussage führten, daß bei der damaligen Technologie des Schmiedens (Schweißen) eine Herstellung sicherer Ketten nicht möglich sei. Er fand zugleich die Lösung, in einer neuen, vorteilhaften Art Drahtseile zu wickeln, die sich schnell in alle Welt verbreitete. Das Drahtseil kann als Paradebeispiel für eine fail safe-Bauweise gelten, bei der, im Gegensatz zu einer Kette, mehrere Lastpfade vorhanden sind, so daß bei Reißen eines Drahtes noch kein Bruch des Seiles auftritt. Das Reißen eines einzelnen Drahtes kann aber durch Inspektion rechtzeitig erkannt werden.

**VII.****Ueber Treibseile am Harz.**

Von

**Herrn Ober-Bergrath Albert**  
zu Clausthal.**Größe und Häufigkeit der Beanspruchung:**

"Zur Erklärung schien mir nichts übrig zu bleiben, als die Hypothese aufzustellen, dass eine Gelenkbiegung des Seils unter einem der Seil- und Förder-Last gleichen Drucke –also etwa 30 Ctr.– der Wirkung eines harten kalten Hammerschlages gleich seyn und mithin dadurch eine Härtung des Gliedes an der Druckstelle eben so eintreten müsse, wie man bekanntlich durch kaltes Hämmern alles Eisen federhart machen könne. Eine aufgestellte Berechnung ergab, dass bei den 14725 Malen, welche sich jedes betreffende Glied während des Statt gehabten Gebrauches ganz hatte herumdrehen müssen, etwa 93120 Biegungen jeder Gelenkstelle unter dem bemerkten starken Drucke auf beiden Scheiben, dem Korbe und oben im Schachte, Statt gehabt hatten."

Die

**Bergwerks - Verwaltung**  
des**Hannoverschen Ober-Harzes**

in den Jahren 1831 – 1836.

Von

**Albert,**

K. u. L. Ober-Bergrath am Harz, Raths- u. s. w.

Es ist besonderer Abdruck aus Bd. X. des Archives für Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Hüttenwesen.

**Experiment:**

"Nach jener Hypothese musste also unter ähnlichen Einwirkungen immer derselbe Erfolg entstehen.

Diese Meinung wurde sehr bestritten, und da von ihrer Richtigkeit der Entschluss über alle ferneren Maassregeln abhing, so blieb nichts übrig, als den Beweis praktisch zu versuchen. Es wurde zu diesem Zweck im Anfang des Jahres 1829 eine bewegliche zwölfbüssige Scheibe mittelst Krummzapfens an ein stets im Gange befindliches Kehrreid gekoppelt. Über die Scheibe wurde ein Stück Seil gelegt, dessen Glieder aus dem ausgesuchtesten zähesten, fadigsten Gewerlaufplatinen-Eisen mit Sorgfalt durch den sehr geschickten Bergschmidsmeister Angerstein jun. angefertigt waren. Am Ende dieses Seilstückes hing eine mit 30 Ctr. beschwerte Wagschale."

*Bild 7:**Auszug aus einer Veröffentlichung Julius Alberts*

Prof. Dr.-Ing. H. Zenner  
Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der TU Clausthal  
Leibnizstraße 32 · 38678 Clausthal-Zellerfeld





WERNER THIEME, Hamburg

## **Die Privatisierung öffentlicher Aufgaben als verwaltungswissenschaftliches Problem**

Braunschweig, 10. März 1995\*

Privatisierung ist heute ein wichtiges politisches Anliegen, in dem die Überlegenheit der Privatwirtschaft gegenüber der zentralgelenkten Staatswirtschaft zum Ausdruck kommt. Finanzierungsprobleme öffentlicher Einrichtungen verstärken die Tendenz zur Privatisierung.

Es wird unterschieden zwischen Privatisierung im materiellen Sinn (= Verkauf öffentlicher Unternehmen an Private) und Privatisierung im formellen Sinne (Organisations-Privatisierung = Bildung besonderer Einheiten, die nach privatwirtschaftlichen Regeln arbeiten, aber in der Hand von Staat oder Gemeinde bleiben). Der Vortrag beschäftigt sich nur mit der Organisations-Privatisierung, die von der Verwaltungswissenschaft begleitet wird.

Ziele der Organisationsprivatisierung sind Bürgerorientiertheit (= Kundenorientiertheit) und ökonomisches Handeln der Verwaltung. Es geht dabei nicht um die öffentlichen Betriebe (z.B. Verkehrsbetriebe), sondern um die Verwaltung im engeren Sinne (z.B. Bauverwaltung, Sozialverwaltung).

Voraussetzung der Privatisierung ist die Umwandlung der Behörden in selbständige Unternehmen (GmbH, Aktiengesellschaft, Stiftung, evtl. auch Körperschaft, Anstalt, Sondervermögen), d.h. die Verselbständigung von Behörden mit eigener Wirtschaftsführung, die Auflösung der streng hierarchisch gegliederten Verwaltung in einen „Konzern“ (Konzernmodell). Jedes Teilunternehmen ist für das Ergebnis, sowohl wirtschaftlich, als auch nach der Qualität verantwortlich. Ziel der Organisations-Privatisierung ist es, die Verwaltung möglichst so wie eine Privatfirma zu führen. Die organisatorische Ausgliederung und die privatwirtschaftliche Form allein nutzen nur, wenn die Aufgabenwahrnehmung nach den Regeln der Privatwirtschaft erfolgen.

Es bestehen keine grundsätzlichen Probleme, die Verwaltung wie ein Unternehmen zu organisieren. Aber die Erreichung der Unternehmensziele muß meßbar gemacht werden. Dazu muß das kameralistische Rechnungswesen völlig auf die Doppik umgestellt werden; dies ist durchaus möglich.

Auch die Identifizierung der Leistungen der Verwaltung als „Produkte“ ist weitgehend möglich. Aber der „Kunde“ kann nicht frei wählen; die Behörde ist Monopolist. Der Bürger muß sie in Anspruch nehmen (Zwangsbedarf). Wettbewerb ist in der Regel

---

\* Bericht über einen Vortrag vor der Klasse für Geisteswissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

ausgeschlossen und nur teilweise organisierbar. An seine Stelle treten Markt- und Wettbewerbssurrogate (fingierte Konkurrenz, Betriebsvergleiche):

Gewinnmaximierung als Unternehmensziel ist nicht notwendig; insofern bestehen keine Schwierigkeiten, andere Ziele zu definieren (z. B. Kostendeckung oder Kostenlimitierung). Aber der Wert der Produkte der Verwaltung ist nicht meßbar, weil ein Markt fehlt. Eine freie Preisfestsetzung ist in der Regel nicht möglich; Entgelte öffentlicher Ausgaben bleiben ein Politikum.

Für die Wirtschaftlichkeit des Verwaltungshandelns ist eine freie Ressourcenbeschaffung notwendig; dies ist im wesentlichen ein Problem der Personalwirtschaft. Der öffentliche Dienst ist durch ein überkompliziertes personalrechtliches System unwirtschaftlich und zu unbeweglich geworden. Der Ausstieg aus der öffentlichen Verwaltung und ein Übersteigen in die Privatwirtschaft ist notwendig. Die Einführung einer Leistungsentlohnung ist dabei wichtig.

Ergebnis: Die Möglichkeit der Organisation der Verwaltung wie eine Privatfirma ist relativ unproblematisch. Aber bei der Aufgabenerfüllung zeigen sich die Probleme, vor allem das Fehlen des echten Wettbewerbs zwischen den Behörden.

Zwei weitere Probleme bleiben auch gegenüber diesen bescheidenen Zielen: 1. Die Führung der Verwaltung wie eine Privatfirma stellt die Möglichkeit politischer Kontrolle in Frage. Das Konzept der Organisations-Privatisierung ist antidemokratisch. 2. Reformen funktionieren nur, wenn die Betroffenen mitmachen; am Reformbewußtsein der öffentlichen Bediensteten fehlt es noch sehr stark.

CARSTEN-PETER WARNCKE, Braunschweig

## Der Grundriß als Sprachmittel einer redenden Architektur

Braunschweig, 10. November 1995\*

Als im Ausgang des 18. und zu Beginn des 19. Jahrhunderts eine allgemeine Neuorientierung der Baukunst vonstatten ging, machte das Schlagwort von einer „architecture parlante“ die Runde. Doch ist die Vorstellung von „redender Baukunst“ weit älter und überhaupt kein Kennzeichen der damals beginnenden bürgerlichen Epoche. Im Gegenteil, die Verwendung der architektonischen Fundamentalinstanzen Grund- und Aufriß als Sprachmittel, mit deren signifikanter Formung darstellerische Botschaften übermittelt werden konnten, die bloße funktionale und ästhetische Aussagen weit überschritten, war ein Prinzip der frühen Neuzeit, jener Epoche, die kunsthistorisch mit den Stilbegriffen Renaissance, Manierismus, Barock und Rokoko belegt wird.

Exemplarisch läßt sich dies demonstrieren an der Raumdisposition des Schloßchens Richmond in Braunschweig, errichtet seit 1768 nach Plänen des damaligen Hofbaumeisters Carl Christoph Fleischer für Auguste Friederike Luise, die Gemahlin des seinerzeitigen Erbprinzen Carl Wilhelm Ferdinand von Braunschweig. Sie hatte sich ein eigenes Haus für ungezwungene Aufenthalte in ländlicher Umgebung gewünscht. Trotz des Charakters eines ländlichen Gelegenheitswohnsitzes verzichtete der Bau nicht auf repräsentative Elemente, ja, er verdankt sogar in erster Linie der Selbstdarstellung des fürstlichen Paares seine Gestalt. Und eben wegen der in gewisser Hinsicht einzigartigen Disposition ist das Gebäude aufschlußreich für die Architektursprache der frühen Neuzeit. Denn der nahezu exaltierte Grundriß von Richmond ist eine Kombination aus mehreren unterschiedlichen, lange etablierten und deswegen aussagekräftigen Anordnungsfiguren für Räume im Herrschaftsbau.

Denkbar einfach ist zunächst die Grundform, ein Quadrat. Aber es ist auf die Spitze gestellt, erscheint als Raute und bietet die Diagonale des Quadrates als Symmetrieachse für die Fügung der Zimmer. An ihr aufgereiht sind die wichtigsten repräsentativen Funktionsräume, das Vestibül, der Salon und der Gartensaal. Dem steht auf beiden Seiten die im rechten Winkel knickende Folge der Zimmer für die Wohnappartements des fürstlichen Paares gegenüber. Richmond entspricht damit der allgemeinen Norm jener Zeit, die Repräsentativräume in die Mittelachse des Hauptgeschosses der Gebäude zu legen und die Wohnräume seitlich anzufügen. In der genau spiegelbildlichen Gleichartigkeit der Appartements für Prinzessin und Erbprinz kommt die architektonische Figur für dynastische Gleichberechtigung zur Anwendung. Sie war vor allem im französischen Palaisbau so zwingend, daß etwa Ludwig XIV. es erst nach dem Tode seiner Gemahlin wagen konnte, sein Schlafzimmer in die Mitte des Hauptgeschosses von Schloß Versailles zu

---

\* Zusammenfassung eines Vortrags vor der Klasse für Geisteswissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

legen. In der besonderen Anordnung der Räume variiert Richmond zugleich das ebenfalls französische Muster der sog. *maison de plaisance*, wie es für ein ländliches Lustschloß angemessen war.

Der ingeniöse Kunstgriff, der die besondere Aussage dieses Grundrisses ausdrückt, liegt aber eher in der paradoxen Tatsache einer Vergrößerung durch Verkleinerung. Denn die zwar harmonisch ausgewogene, aber an sich schlichte und für eine anspruchsvolle Fügung der Zimmer extrem ungünstige Form des Quadrates kannte man nicht bei den Varianten der *maison de plaisance* und erst recht nicht bei höherrangigen Herrschaftsbauten wie Residenzen, weil die zeremoniell unerläßlichen Raumfiguren darin praktisch nicht untergebracht werden können. Indem aber bei Richmond das Quadrat auf die Spitze gestellt ist, wird in der Mitte Platz gewonnen, weil die Diagonale im Quadrat länger ist als die Seiten. So war es möglich, die zentrale Achse der *maison de plaisance* aus Vestibül und dahinter liegendem großen Salon zu übertreffen und sogar drei Räume, nämlich Vestibül, Salon und Gartensaal zu reihen, was dem Aufwand einer Residenz gleichkommt – und das bei einem sehr kleinen Gebäude von nur 20 Metern Seitenlänge!

Damit wird nicht nur der fürstliche Rang der Bauherren als primäre Botschaft der Sprache dieses Schloßchens ausgedrückt, sondern auch in der Umkehrung der Formcharaktere eine rhetorische Figur angewandt. Hierin liegt auch der prinzipielle Unterschied solch sprechender Baukunst zur späteren „*architecture parlante*“. Sie nämlich benutzte nicht rhetorische, sondern abbildliche Figuren für ihre Formensprache, versuchte also einen Neuanfang, indem sie die Prämisse zwar beibehielt – Architektur als Sprache –, aber deren Inhalt auswechselte.

## KOMMISSIONEN

### **Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte**

1. Nach dem Tode Prof. Dr. phil. habil. Dr. h.c. phil. Martin Gosebruchs (17.9.1992) stagnierte die Arbeit der Kommission, mit der Berufung eines neuen Vorsitzenden durch den Präsidenten Anfang 1994 wurde die Arbeit wieder aktiviert. Die Zusammensetzung der Kommission veränderte sich: drei Mitglieder traten aus, zwei baten wegen ihres Alters um Entlastung; durch Zuwahl von elf Mitgliedern wurde die Arbeitsfähigkeit gesichert.

Zukünftig wird die Kommission jährlich Anfang Oktober eine Sitzung durchführen zu ihrer Arbeit, zum Stand gemeinsamer Vorhaben, zu Tagungen, Publikationen u.ä. sowie zu allgemeinen Fragen des Faches. Ein Fachvortrag soll diskutiert werden. Alle zwei Jahre findet die Kommissionssitzung im Rahmen eines Symposions zu einem Thema statt, das in Zusammenhang mit niedersächsischer Bau- und Kunstgeschichte steht. Das nächste Symposion wird im Oktober 1996 stattfinden.

Als künftige Arbeitsthemen wurden genannt: Erfassung romanischer Architektur in Niedersachsen; Baukunst der Zisterzienser; Romanische Backsteinbauten; Naumburg; Hochmittelalterliche Bauornamentik; Großbronzen in Sachsen und Thüringen; Schatzkunst und Kirchenschätze; Altartafeln in Niedersachsen (Herbst 1996); Die Kunst am Magdeburger Hof der Erzbischöfe Ernst von Wettin und Albrecht von Brandenburg; Renaissance in Niedersachsen (zusammen mit Wolfenbüttel); Barock im Braunschweiger Land (Vorarbeiten liegen bei der BWG vor). Das nach Magdeburg, Goslar und Halberstadt geplante Symposion in Quedlinburg fand keine Zustimmung mehr in der Kommission, eine entsprechende Veranstaltung der Kunsthistorisch-Musikwissenschaftlichen Kommission der Sächsischen Akademie der Wissenschaften in Leipzig muß aus finanziellen und personellen Gründen ausfallen.

2. Beratungen fanden am 22.4., 11.11.1994 und 7.10.1995 statt. Die Beiträge des Symposions „Goslar – Bergstadt – Kaiserstadt in Geschichte und Kunst“ (1989) sind 1993 im Verlag Erich Goltze GmbH & Co. KG, Göttingen erschienen. Der Band zum Symposion „Königtum und Kirche im östlichen Harzvorland – Halberstadt“ (1991) geht Ende dieses Jahres als 7. Band der Schriftenreihe in Druck.

Auf der Oktobersitzung diesen Jahres referierte Herr Dr. Krohm, Berlin, über „Spätmittelalterliche Retabelkunst in Norddeutschland“. Er zeigte bislang wenig beachtetes Material, machte bewußt, welche weitreichende Wirkung niedersächsische Werkstätten und Meister um 1500 übten und welche Probleme der Diskussion bedürfen. Er legte ein durchdachtes Konzept, ein weit gediehenes Programm und eine erste Referentenliste für das Symposion 1996 vor. Konzeption sowie die Entwürfe von Programm und Rednerliste wurden bestätigt. Sollte es Probleme bei der Durchführung in Braunschweig geben, bot Dr. Brand Hildesheim als Tagungsort an.

Prof. Dr. Ernst Ullmann



## Vortragsreihe

Im Rahmen der Ausstellung „Heinrich der Löwe und seine Zeit“ veranstaltete die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft gemeinsam mit dem Herzog Anton Ulrich-Museum eine Vortragsreihe. Die folgenden Vorträge fanden statt:

- 16.08.1995 Prof. Dr. Joachim Ehlers (Freie Universität Berlin):  
**Heinrich der Löwe und England**
- 23.08.1995 Prof. Dr. Otto Gerhard Oexle  
(Max-Planck-Institut für Geschichte Göttingen)  
**Denkmale Heinrichs des Löwen**
- 13.09.1995 Prof. Dr. Hartmut Boockmann (Humboldt-Universität Berlin/  
Georg-August-Universität Göttingen):  
**Bilder von Heinrich dem Löwen im 19. und 20. Jahrhundert**
- 27.09.1995 Dr. Franz Niehoff (Herzog Anton Ulrich-Museum Braunschweig):  
**Heinrich der Löwe in Italien, Palästina und England – Lebensweg als  
Kunsterfahrung**
- 11.10.1995 Prof. Dr. Bernd Schneidmüller (Otto-Friedrich-Universität Bamberg):  
**Pfalz – Stadt – Vaterland. Braunschweig und die Welfen im hohen  
Mittelalter**
- 18.10.1995 Prof. Dr. Dietrich Kötzsche (Berlin):  
**Der Welfenschatz**
- 08.11.1995 Prof. Dr. Trude Ehlert  
(Bayerische Julius-Maximilian-Universität Würzburg):  
**Literatur als Medium der Repräsentation am Hofe Heinrichs des  
Löwen**





# **FEIERLICHE JAHRESVERSAMMLUNG 16. JUNI 1995**

## **ÖFFENTLICHE WISSENSCHAFTLICHE VORTRÄGE**

ELMAR STECK, Braunschweig

### **Zur Berücksichtigung von Vorgängen im Mikrobereich kristalliner Werkstoffe bei der Entwicklung von Stoffmodellen**

The macroscopic behaviour of crystalline materials under mechanical or thermal loadings is determined by processes in the micro-region of the material. The stochastic character of these mechanisms can be considered by modelling them as stochastic processes which result in Markov-chains.

By a combination of models on the basis of molecular dynamics and cellular automata it seems possible to simulate numerically the formation of internal structures during the deformation processes which influence the macroscopical behaviour substantially.

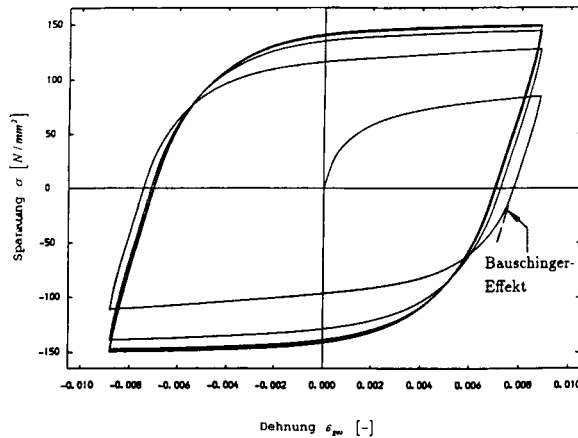
Das makroskopische Verhalten kristalliner Werkstoffe bei mechanischer oder thermischer Belastung wird von Vorgängen im Mikrobereich des Materials bestimmt. Der stochastische Charakter dieser Vorgänge kann durch die Modellierung als stochastischer Prozeß erfaßt werden, der auf Markov-Ketten führt.

Mit Hilfe einer Kombination von Modellen auf der Basis der Molekulardynamik und der zellulären Automaten erscheint es möglich, die Bildung innerer Strukturen während der Verformungsvorgänge, die das makroskopische Verhalten wesentlich beeinflussen, numerisch zu simulieren.

### **Einleitung**

Metallische Werkstoffe zeigen, wie auch andere kristallin aufgebaute Materialien, bei Beanspruchung durch mechanische Lasten typische makroskopische Antworten, die durch die Vorgänge im Mikrobereich hervorgerufen sind. Bild 1 zeigt ein typisches zyklisches Spannungs-Dehnungsdiagramm, bei dem die Dehnschwingbreite konstant gehalten wurde. Man erkennt zyklische Verfestigung und den Bauschinger-Effekt, der sich darin ausdrückt, daß bei Lastumkehr plastisches Fließen bei wesentlich niedrigeren Spannungen eintritt, als denjenigen, aus denen entlastet wurde. Für die technische Anwendung der metallischen Werkstoffe ist die Erfassung derartiger Vorgänge in mathematischen Werkstoffmodellen außerordentlich wichtig.

Die Entwicklung der numerischen Methoden zur Behandlung kontinuumsmechanischer Anfangs-Randwertprobleme ist weit fortgeschritten. Wenn zutreffende mathematische Darstellungen des Werkstoffverhaltens vorhanden sind, können mit diesen Verfahren Bauteile und Strukturen in allen Bereichen der Technik ausgelegt und ihr Verhalten bei komplexen Belastungsvorgängen numerisch simuliert werden.



*Bild 1*  
Zyklisches Spannungs- Dehnungsdiagramm  
für 304 Stainless-Steel.  $T = 600\text{ °C}$ .

Die Bewegung von Versetzungen ist der wesentliche Träger der plastischen Verformung bei metallischen Werkstoffen. Im folgenden wird ein stochastisches Modell erläutert, das das Ziel hat, Verfestigungs- und Entfestigungsvorgänge im Material in Form von Markov-Ketten zur erfassen.

Im Verlauf des Verformungsprozesses ordnen sich die Versetzungen in einer Hierarchie von Strukturen wie Mauern, Adern, Bündel oder Zellen an. Diese Strukturbildung beeinflusst das makroskopische Verhalten des Materials wesentlich. Über das Prinzip der zellulären Automaten, in Verbindung mit Ansätzen der Molekulardynamik, wird diese Strukturbildung numerisch simuliert.

## Mechanismen im Mikrobereich

Bild 2 zeigt schematisch einen zweidimensionalen Ausschnitt aus dem Gefüge geordneter Substitutionsmischkristalle [1]. Man erkennt eine Vielfalt von Störungen des regelmäßigen Gitteraufbaus, von denen die Versetzungen für das plastische Verhalten die wichtigsten Größen sind, da sie als linienförmige Gitterstörungen das Abgleiten von Gitterebenen gegeneinander sehr erleichtern und dadurch die Fließgrenze realer Werkstoffe gegenüber derer für Einkristalle erheblich absenken.

Die Versetzungsbewegung und damit die durch äußere Lasten verursachten Verformungen werden durch zwei wichtige Aktivierungsvorgänge bestimmt. Das ist einmal die Spannungsaktivierung, die durch die äußeren Lasten hervorgerufen wird, und zum anderen die thermische Aktivierung, die bei höheren Temperaturen die durch die Belastung hervorgerufenen Versetzungsbewegungen und damit die plastischen Verformungen unterstützt.

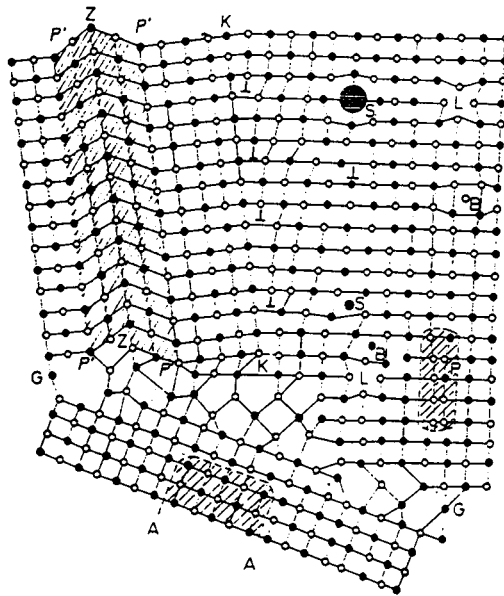


Bild 2

Zweidimensionaler Ausschnitt aus einem schematischen Gefüge  
 von geordneten Substitutionsmischkristallen (G. Petzow [1]).  
 L Leerstelle; B Zwischengitteratom; S Fremdatom;  $\perp$  Versetzung

Bild 3 zeigt schematisch die im Mikrobereich der Versetzungsbewegung entgegenstehenden Hindernisse in Form von Hindernispotentialen  $U^*$ , die durch die Temperatur gegebene mögliche Lage einer Versetzung relativ zu diesen Hindernispotentialen und die Wirkung einer von außen angelegten Spannung und einer Temperaturerhöhung auf die energetischen Verhältnisse an dieser Versetzung. Man erkennt, daß das Potential  $U^*$  der äußeren Kräfte durch Überlagerung dasjenige der vorhandenen Hindernisse so verändert, daß die Versetzungsbewegung in Richtung der angelegten Spannung wahrscheinlicher wird, als diejenige in entgegengesetzter Richtung, und daß die thermische Aktivierung diesen Vorgang unterstützt.

Die der Versetzungsbewegung entgegenstehenden Hindernisse sind einmal durch die kristalline Struktur des Werkstoffs selbst gegeben, zum andern können Fremdatome und Korngrenzen als Hindernisse wirken. Mit die wichtigste Ursache der Behinderung der Versetzungsbewegung sind aber die Versetzungen selbst. Bei plastischer Verformung entstehen ständig neue Versetzungen. Hierdurch wird anfänglich die Fähigkeit des Werkstoffes, sich plastisch zu verformen, gesteigert. Mit wachsender Versetzungsdichte tritt aber eine gegenseitige Beeinflussung der Gitterstörungen auf, die zur isotropen Verfestigung führt.

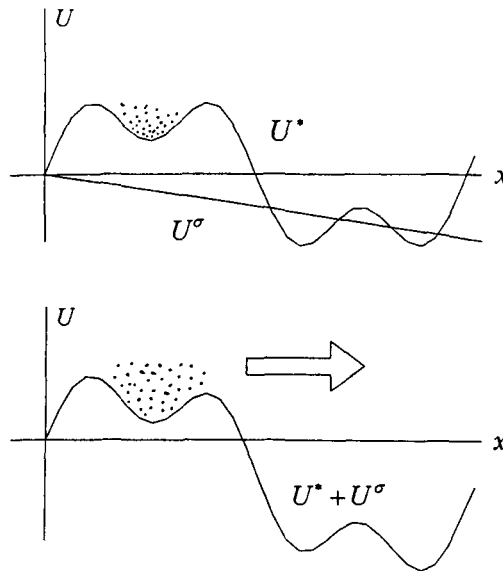


Bild 3  
Spannungs- und thermische Aktivierung

Mit den durch die plastischen Verformungen verbundenen Gitterverzerrungen wird im Werkstoff elastische Energie gespeichert, die ebenfalls die Bewegung der sie erzeugenden Versetzungen behindert. Man nennt diesen Vorgang kinematische Verfestigung. Die inneren Spannungen unterstützen jedoch Versetzungsbewegungen in der entgegengesetzten Richtung und bewirken damit z.B. den Bauschinger-Effekt.

Bei höheren Temperaturen – oberhalb der halben Schmelztemperatur des Werkstoffs, gemessen in Kelvin – treten thermisch aktivierte Ordnungsvorgänge in den Kristalliten auf, die die gegenseitige Behinderung der Versetzung vermindern und damit makroskopisch zu einer Entfestigung führen.

Für diese Vorgänge kennzeichnende Größen sind in Bild 4 dargestellt, das eine Versetzung zeigt, die durch andere Versetzungen behindert ist. Das schraffierte Gebiet ist ein Maß für das sogenannte Aktivierungsvolumen  $\Delta V$ , das bei wachsender isotroper Verfestigung an Größe abnimmt.  $b$  ist hierbei der Burgersvektor, der durch seine Lage zur Versetzungslinie den Charakter der Versetzung bestimmt.  $\rho_w$  ist die Dichte der sogenannten Waldversetzungen, d.h. der Versetzungen die die anderen in ihrer Bewegung behindern.

Tabelle I zeigt den Zusammenhang zwischen Aktivierungsvolumen und den wichtigsten Verformungsmechanismen für verschiedene Bereiche der homologen Temperatur  $T/T_m$

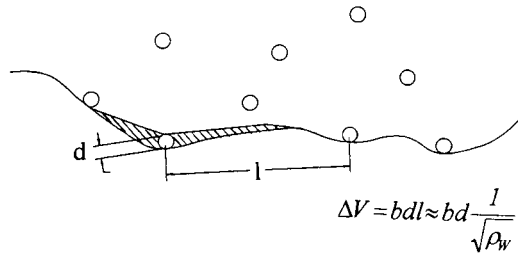


Bild 4  
Aktivierungsvolumen

Verformungs- mechanismus	Temperatur- bereich $T/T_m$	Aktivierungsvolumen
Klettern	$> 0,5$	$b^3$ ; der Wert bleibt während der Verformung konstant
Bewegung von Versetzungssprüngen	$> 0,5$	$10-1000b^3$ ; der Wert des Aktivierungsvolumens sinkt während der Verformung
Quergleiten	$0,2-0,4$	$10-100b^3$ ; der Wert bleibt während der Verformung annähernd konstant
Schneiden von Versetzungen	$> 0,3$	$> 1000b^3$ ; das Aktivierungsvolumen wird durch die Zunahme von Waldversetzungsdichte mit der Verformung kleiner

### Das stochastische Werkstoffmodell

Wie aus der Beschreibung der für plastische Verformungen maßgebenden Vorgänge im Mikrobereich zu erkennen ist, besitzen diese einen stark stochastischen Anteil. Bild 5 zeigt an einem vereinfachten Fall für Vorgänge bei hohen Temperaturen unter Berücksichtigung nur isotroper Verfestigung das verwendete stochastische Modell.

Über der Zustandsachse, die die Stärke der isotropen Verfestigung  $\sigma^{iso}$  und damit die Höhe der der Versetzungsbewegung entgegenstehenden Hindernisse darstellt, ist die Verteilung der „Fließeinheiten“ (Versetzungen, Versetzungspakete oder Korngrenzen) über der Hindernisstärke aufgetragen. Die Wirksamkeit der von außen angelegten Spannung wird durch die Verfestigungsspannung reduziert, so daß die Versetzungsbewegung nur durch die effektive Spannung

$$\sigma_{eff} = \sigma - \sigma^{iso} \quad (1)$$

bewirkt wird.

In Abhängigkeit von  $\sigma^{iso}$  und  $\sigma_{eff}$  wird eine Verfestigungswahrscheinlichkeit

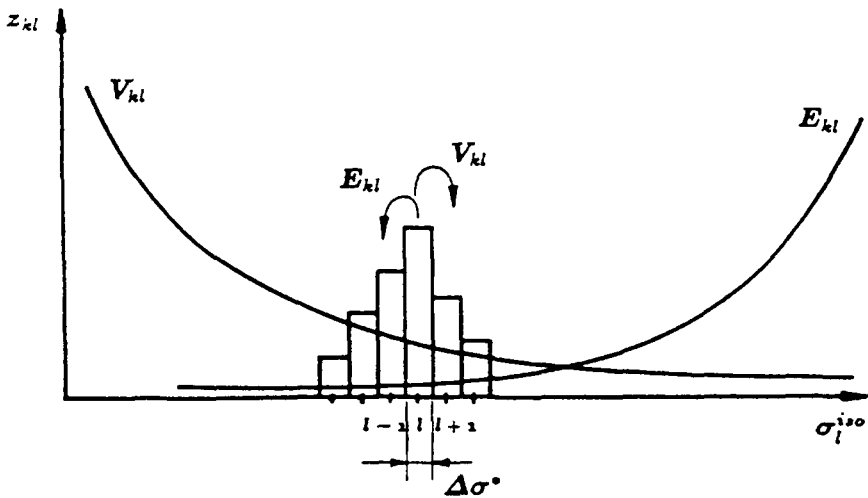


Bild 5

Stochastisches Modell für Hochtemperaturplastizität

$$V_{k,l} = c_l \Delta t \exp \left( - \frac{U_o + \Delta V \sigma_l^{iso}}{k_B T} \right) \sinh \left( - \frac{\Delta V |\sigma_l^{eff}|}{k_B T} \right) \quad (2)$$

angesetzt [2]. Diese Übergangswahrscheinlichkeit beruht auf der Voraussetzung daß die thermische Aktivierung der Versetzungen gemäß einer Boltzmann-Verteilung angesetzt werden kann.  $U_o$  ist hierbei die Aktivierungsenergie der Selbstdiffusion, die die Hinderungsverteilung darstellt, die durch den Aufbau des Kristalles gegeben ist,  $k_B$  die Boltzmannkonstante,  $\Delta t$  der für die Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des Prozesses angenommene Zeitschritt und  $c_l$  eine experimentell zu bestimmende Konstante.

Man erkennt, daß die Übergangswahrscheinlichkeit von einem bestimmten Verfestigungszustand auf den nächsthöheren mit wachsender Verfestigung geringer wird.

Der Verfestigung entgegen wirkt ein Entfestigungsprozess gemäß

$$E_{k,l} = c_2 \Delta t \exp \left( - \frac{\alpha_1 U_o}{k_B T} \right) \exp \left( - \frac{\beta_1 \Delta V \sigma_l^{iso}}{k_B T} \right) \quad (3)$$

der thermisch aktiviert ist und nicht von der äußeren Spannung abhängt.  $c_2$ ,  $\alpha_1$  und  $\beta_1$  sind wieder experimentell zu bestimmende Konstanten. Da die Stärke der Gitterverspannungen mit wachsender Verfestigung ansteigt, und diese den Entfestigungsprozeß unterstützen, werden die Übergangswahrscheinlichkeiten für die Entfestigung mit wachsender Verfestigung größer.

Das Modell simuliert also Verfestigung und Erholung durch Übergänge von Versetzungen an einer Hindernisstärke  $\sigma_{i+1}^{iso}$  zu höheren Hindernissen  $\sigma_{i+1}^{iso}$  und niedrigeren Hindernissen  $\sigma_{i+1}^{iso}$ . Die Wahrscheinlichkeit, daß eine Fließeinheit in ihrem augenblicklichen Zustand verbleibt, ist durch

$$B_{i,i} = 1 - V_{i,i+1} - E_{i,i-1} \quad (4)$$

gegeben.

Die Übergangswahrscheinlichkeiten des Modells lassen sich in der stochastischen Matrix

$$\underline{SM} = \begin{bmatrix} E_{i-1,i-2} & 0 & 0 \\ B_{i-1,i-1} & E_{i,i-1} & 0 \\ V_{i-1,i} & B_{i,i} & E_{i+1,i} \\ 0 & V_{i,i+1} & B_{i+1,i+1} \\ 0 & 0 & V_{i+1,i+2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

anordnen. Die Änderung der durch den Zustandsvektor  $\underline{z}$  gegebenen Struktur während eines Zeitschritts  $\Delta t$  ist durch die Markov-Kette

$$\underline{z}(t + \Delta t) = \underline{SM} \underline{z}(t) \quad (6)$$

gegeben. Bei konstanter Spannung und Temperatur (homogener Prozeß) ergibt sich für den Zustandsvektor nach  $n$  Zeitschritten

$$\underline{z}(t_o + n\Delta t) = \underline{SM}^n \underline{z}(t_o) \quad (7)$$

Die durch Gleichung 4 gegebene stochastische Matrix läßt sich auf Hauptachsen transformieren und nimmt dann die Form

$$\underline{\tilde{SM}} = \underline{M}^{-1} \underline{SM} \underline{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

an, wobei  $\underline{M}$  die Modalmatrix, d.h., die Matrix der spaltenweise angeordneten Eigenvektoren der Matrix  $\underline{SM}$  darstellt.

Die entsprechende Markov-Kette stellt sich dann in der Form

$$\underline{\tilde{z}}(t) = \underline{\tilde{SM}}^n \underline{\tilde{z}}(t_o) \quad (9)$$

dar. Da stochastische Matrizen einen größten Hauptwert 1 besitzen und alle anderen Eigenwerte dem Betrag nach kleiner als 1 sind, erkennt man, daß deren Beiträge mit wachsender Zeit abklingen, und der zum größten Eigenwert 1 gehörende Eigenvektor einen stationären Zustand kennzeichnet. Die Markov-Kette ist damit in der Lage, das sogenannte stationäre Kriechen darzustellen. Die übrigen Hauptwerte sind für transiente Vorgänge verantwortlich.

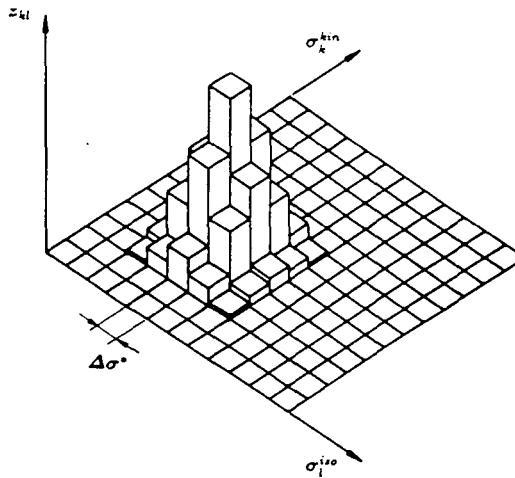


Bild 6  
Erweiterung des stochastischen Modells

Eine Erweiterung des stochastischen Modells, die die gleichzeitige Berücksichtigung der Entwicklung der isotropen Verfestigung und der kinematischen Verfestigung zuläßt, zeigt Bild 6.

Isotrope und kinematische Verfestigung spannen eine Zustandsebene auf, die zuläßt, daß bei der Verteilung der Fließeinheiten ihr jeweils durch die beiden Verfestigungsarten gegebener Zustand berücksichtigt werden kann. Die hier für die Entwicklung der kinematischen und isotropen Verfestigung gegebenen Übergangswahrscheinlichkeiten berücksichtigen jeweils die durch die andere Verfestigungsart gegebenen Einflüsse [3].

Durch eine Mittelwertbildung [3] erhält man aus dem stochastischen Modell ein makroskopisches kontinuumsmechanisches Werkstoffmodell, das eine ähnliche Form annimmt wie andere in der Literatur vorgeschlagene Stoffmodelle:

Das Werkstoffverhalten wird durch eine Beziehung für die inelastische Dehnrage

$$\dot{\epsilon}_{ic} = C \exp \left( - \frac{U_o}{k_B T} \right) \sinh \left( \frac{\Delta V |\sigma - \sigma^{kin}|}{k_B T} \right) \exp \left( - \frac{\Delta V \sigma^{iso}}{k_B T} \right) \quad (10)$$

beschrieben, in der als innere Variable die augenblicklichen Werte für die kinematische und die isotrope Verfestigung auftreten.

Für diese inneren Variablen ergeben sich Entwicklungsgleichungen der Form

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}^{iso} = & b_1 \exp \left( \frac{U_o}{k_B T} \right) \sinh \left( \frac{\Delta V |\sigma - \sigma^{kin}|}{k_B T} \right) \exp \left( - \frac{\Delta V \sigma^{iso}}{k_B T} \right) \\ & - b_2 \exp \left( - \frac{\alpha_1 U_o - \beta_1 \Delta V \sigma^{iso}}{k_B T} \right) \end{aligned} \quad (11)$$



für die innere isotrope Spannung und der Form

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}^{kin} = & b_3 \exp\left(\frac{U_o}{k_B T}\right) \sinh\left(\frac{\Delta V |\sigma - \sigma^{kin}|}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{\Delta V \sigma^{iso}}{k_B T}\right) \\ & - b_4 \exp\left(-\frac{\alpha_2 U_o - \beta_2 \Delta V \sigma^{kin}}{k_B T}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

für die innere kinematische Spannung. Die Größen  $C$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $\Delta V$ ,  $a_1$ ,  $\beta_1$ ,  $a_2$ ,  $\beta_2$ ,  $\sigma_o^{iso}$  sind Werkstoffparameter, die durch Vergleich mit Versuchsergebnissen ermittelt werden müssen.

Der Parameteridentifikation, die darin besteht, daß die nichtlinearen gewöhnlichen Differentialgleichungen für veränderliche Parametersätze integriert und durch geeignete Optimierungsverfahren die optimalen Parametersätze gesucht werden müssen, muß besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich der eingesetzten mathematischen Methoden geschenkt werden [4]. Die Bilder 7 bis 9 zeigen Ergebnisse derartiger Anpassungen. Bild 7 zeigt eine Anpassung an zyklische Versuche an Kupfer bei Raumtemperatur, bei der sieben Parameter anzupassen waren. Bild 8 zeigt den Vergleich zwischen experimentellen und durch das Modell gegebenen Kriechkurven für den Stahlwerkstoff SS 316L bei einer Temperatur von 750°C. Die Parameter wurden für die gegebenen Spannungen simultan angepaßt, so daß die berechneten Kurven mit einem einzigen Parametersatz gewonnen wurden. Bild 9 zeigt bei der gleichen Temperatur experimentelles und theoretisches Ergebnis eines Relaxationsversuchs.

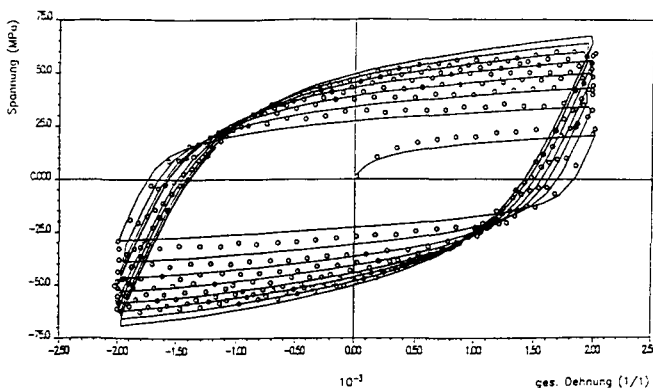


Bild 7

Modellanpassung an zyklische Versuche an Kupfer bei Raumtemperatur

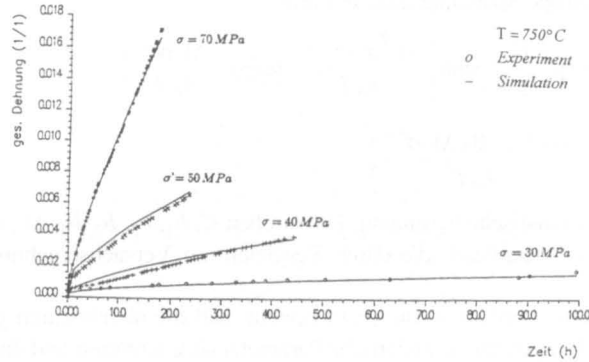


Bild 8  
Modellanpassung an Kriechkurven für den Stahlwerkstoff SS 316L.  $T=750^{\circ}\text{C}$ .

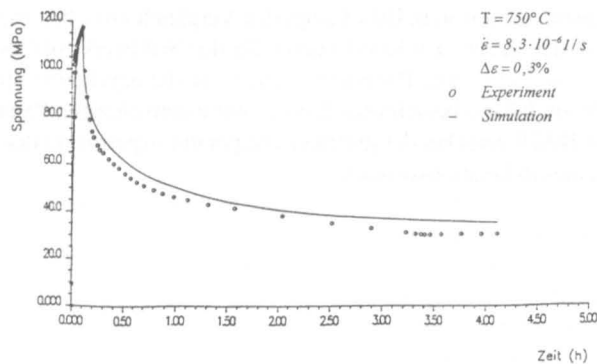


Bild 9  
Ergebnis eines Relaxationsversuchs

### Simulation der Entwicklung von Versetzungsstrukturen.

Sowohl bei einsinnigen als auch zyklischen plastischen Verformungen beobachtet man die Entwicklung von Versetzungsstrukturen z.B. in Form von Adern (Bild 10) oder Versetzungszellen (Bild 11), die in typischer Weise von Belastungsgeschichte und Beanspruchshöhe abhängen.

Da die Bildung dieser Versetzungsstrukturen das makroskopische Verhalten der Werkstoffe wesentlich beeinflusst, kann die Simulation dieser Selbstorganisationsvorgänge unter Umständen wertvolle Hinweise für die Wahl der Ansätze in den Werkstoffmodellen ergeben, die zur Beschreibung von Vorgängen im Mikrobereich herangezogen werden.

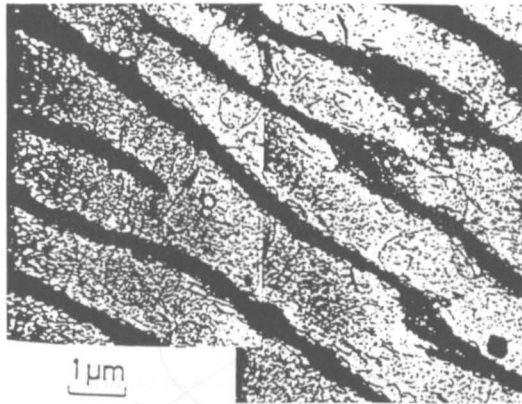


Bild 10  
Adern nach Mughrabi

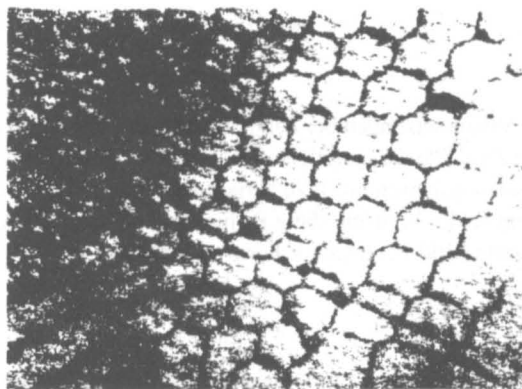


Bild 11  
Zellen nach Honeycombe

Die Wechselwirkung einer Vielzahl gleicher Teilchen ist der grundlegende Gedanke bei der Definition eines zellulären Automaten. Es handelt sich dabei um eine Idealisierung physikalischer Systeme, bei der sowohl der Raum als auch die Zeit diskret sind. Jede Zelle kann bei der zeitlichen Entwicklung nur Werte (Zustände) aus einer endlichen Menge annehmen. Für alle Zellen gelten dieselben Entwicklungsregeln. Die Zustandsentwicklung einer Zelle hängt vom Zustand der Zelle selbst und den Zuständen ihrer Nachbarzellen ab. Ein Zellularautomat ist durch die vier folgenden Merkmale vollständig charakterisiert [5]:

1. Geometrie der Zellanordnung,
2. Definition der Nachbarschaft,
3. Definition der möglichen Zustände einer Zelle,
4. Entwicklungsregeln.

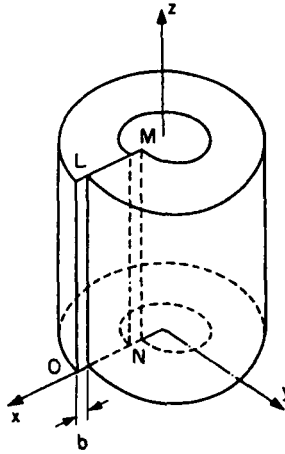


Bild 12  
Stufenversetzung

Entgegen üblicher Voraussetzungen bei Zellularautomaten, bei denen der Zustand einer Zelle nur durch die Zustände der unmittelbaren Nachbarn beeinflusst wird, ist bei der Simulation von Versetzungsbewegungen zu berücksichtigen, daß die Versetzungen weitreichende Spannungsfelder besitzen, die z.B. für das kontinuumsmechanische Modell einer Stufenversetzung (Bild 12) folgende Form annehmen:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= -\frac{Gb}{2\pi(l-\nu)} \frac{y(3x^2+y^2)}{(x^2+y^2)^2} & \sigma_{yy} &= \frac{Gb}{2\pi(l-\nu)} \frac{y(x^2+y^2)}{(x^2+y^2)^2} \\ \sigma_{xy} &= -\frac{Gb}{2\pi(l-\nu)} \frac{y(x^2+y^2)}{(x^2+y^2)^2} & \sigma_{zz} &= \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0,\end{aligned}\quad (13)$$

$G$  ist hierbei der Schubmodul,  $b$  der Burgersvektor und  $\nu$  die Querkontraktionszahl.

Die Bilder 13 und 14 zeigen Ergebnisse einer Simulation, bei der nur ein Gleitsystem in horizontaler Richtung zugrundegelegt wurde. Das Modell setzt ein Raster von Rechteckzellen voraus, die mit Stufen- oder Schraubenversetzungen positiven oder negativen Vorzeichens besetzt sein können [6]. Die Übergangsregeln lauten: Eine positiv oder negativ besetzte Zelle wird eine leere Zelle, wenn die sich dort befindende Versetzung unter Einfluß der auf sie wirkenden Kräfte eine Nachbarzelle besetzt oder es zu einer Annihilation mit einer anderen Versetzung in der Nachbarschaft kommt. Die Schrittweite einer Versetzung ist immer eine Zelle pro Zeitschritt. Es sind als Zielfelder die Zellen rechts, links, oben oder unten möglich. Es handelt sich nach der Nachbarschaftsdefinition um eine 5er Nachbarschaft [7]. Für die Berechnung der Kräfte auf eine Versetzung ist eine größere Nachbarschaft notwendig, da Spannungsfelder von Versetzungen eine große Reichweite haben. Die Größe dieser Nachbarschaft ist durch die Vorgabe einer

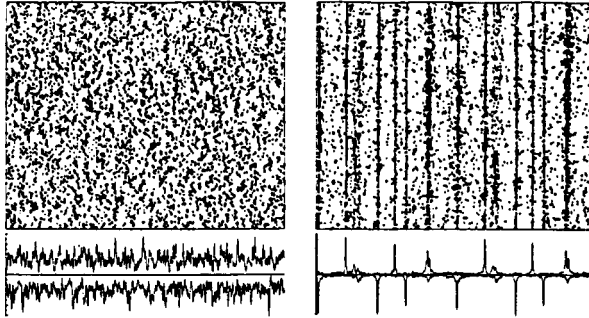


Bild 13  
Relaxation einer Zufallsanfangsverteilung

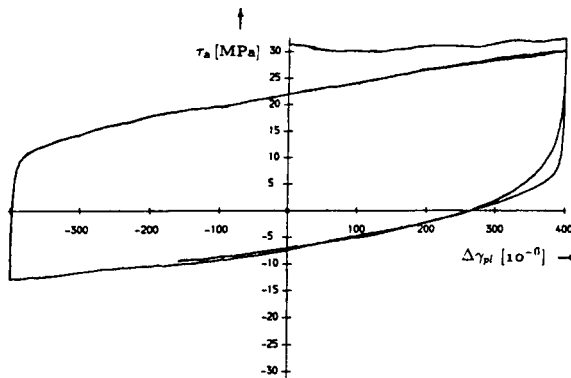


Bild 14  
Erforderliche äußere Schubspannung bei dehnungsgesteuerter  
zyklischer Simulation

Wechselwirkungsreichweite bestimmt, die so gewählt werden muß, daß die gegenseitige Beeinflussung der Versetzungen noch physikalisch zutreffend modelliert wird, aber der mit der Berechnung der Kräfte zwischen den Versetzungen verbundene Rechenaufwand minimiert wird.

Die Kräftebilanz entscheidet, ob und in welche Richtung sich eine Versetzung bewegt. Sie wird in jedem Zeitschritt für jede Versetzung  $i$  für beide Freiheitsgrade aufgestellt:

$$|F_a + \Sigma F_{ij}| > F_f \quad (14)$$

wobei  $F_a$  die durch die äußere Spannung  $\sigma_a$  verursachte Kraft ist,  $\Sigma F_{ij}$  die resultierende Kraft aus den Wechselwirkungen der betrachtenden Versetzung mit anderen Versetzungen.  $F_f$  ist eine Reibkraft, die der Bewegungsrichtung entgegengesetzt ist. Die Kräfte-

bilanz muß sowohl für die Hauptgleitrichtung als auch für die senkrecht dazu liegende Kletter- bzw. Quergleitrichtung berechnet werden.

Mit diesem Modell ist es möglich, die Dynamik einiger tausend Stufen oder Schraubenversetzungen auf parallelen Gleitebenen in Feldern beliebiger Größe zu berechnen. Untersuchungen mit Feldgrößen von  $10\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$  und Versetzungsdichten von etwa  $10^{14}\ \text{m}^{-2}$  zeigen, ausgehend von einer Zufallsanfangsverteilung der Stufenversetzungen, Strukturbildung.

Bild 13 stellt die Relaxation einer Zufallsanfangsverteilung von je 4000 positiven und negativen Stufenversetzungen in einem Feld von  $10\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$  (Skalenfaktor 1250 Zellen pro  $\mu\text{m}$ ) nach jeweils 1000 Zeitschritten bei vernachlässigbarer Reibkraft in Gleitrichtung dar. Links ist eine Wechselwirkungsreichweite von  $\pm 0,8\ \mu\text{m}$ , rechts eine solche von  $\pm 2\ \mu\text{m}$  in vertikaler Richtung vorgegeben. Es bilden sich bei hoher Wechselwirkungsreichweite in Vertikalrichtung ausgeprägte monopolare Mauern aus.

In Bild 14 ist der Verlauf der erforderlichen äußeren Schubspannung über dem Abgleitwinkel bei dehnungsgesteuerter zyklischer Simulation nach monotoner Vorverformung dargestellt. Man erkennt Bauschinger-Effekt und zyklische Entfestigung.

Eine realistischere Simulation der Bildung von Versetzungsstrukturen erhält man durch Modelle, die mehrere Gleitebenen berücksichtigen. Bild 15 zeigt das Gleitsystem, das für kubisch flächenzentrierte Gitteraufbau vorliegt. Bild 16 stellt die Wiedergabe der Gleitvorgänge auf diesem System mit drei Gleitrichtungen jeweils im Winkel von  $60^\circ$  zueinander dar.

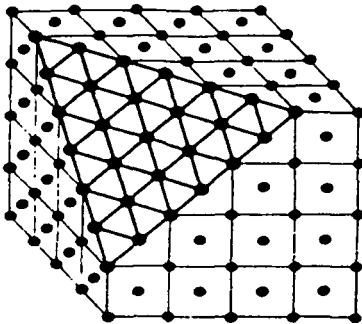


Bild 15  
Gleitsystem für kubisch-  
flächenzentrierte Kristalle

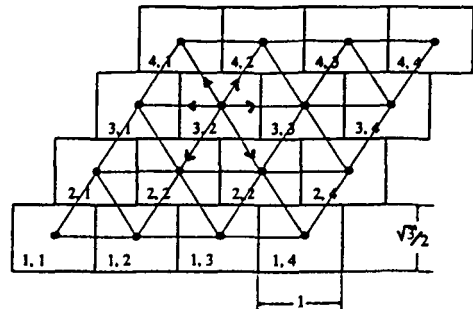


Bild 16  
Zellulärer Automat mit drei Gleitrichtungen

Die Kräftebilanz setzt sich hierbei aus den aus der Wechselwirkung mit anderen Versetzungen stammenden Kräften

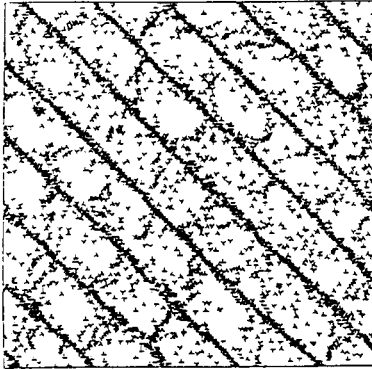
$$\underline{F}^i = \sum_j (\underline{\sigma}^j \cdot \underline{b}) \times \underline{\xi} \quad (15)$$

den äußeren Kräften  $\underline{F}^a$  und einer durch die Gitterstruktur vorhandenen Reibkraft  $\underline{F}^r$  zusammen. Sobald sich die Gesamtkraft

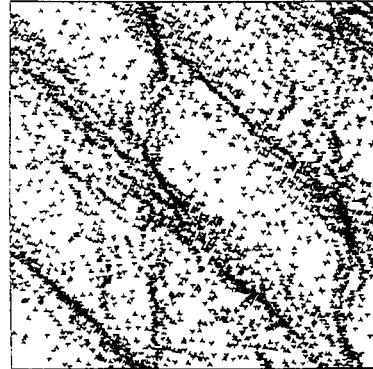
$$\underline{F^{ges}} = \underline{F^i} + \underline{F^a} - \underline{F^r} \quad (16)$$

als größer Null ergibt, wird angenommen, daß sich die Versetzung bewegt.

Man erkennt aus den Bildern 17 und 18, daß die Simulation eine Mauern- bzw. Zellstruktur der Versetzungen ergibt.



*Bild 17*  
*Simulationsergebnis, Bildung von*  
*Mauern*



*Bild 18*  
*Simulationsergebnis, Bildung von Zellen*

Eine Erweiterung dieses Modells mit Berücksichtigung von Fremdatomen, Leerstellen und einem geeigneten Geschwindigkeitsgesetz wird zur Zeit vorgenommen. Dabei wird der Parallelisierung der Berechnungsalgorithmen besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

## **Zusammenfassung**

Die Berücksichtigung von Vorgängen im Mikrobereich kristalliner Werkstoffe kann auf verschiedenen Größenskalen untersucht werden. Geht man von einer Skala aus, in der die Prozesse durch Aktivierungsvolumina und Aktivierungsenergien in Form von thermischen und mechanischen Aktivierungsprozessen dargestellt werden, so lassen sich die stochastischen Eigenschaften der Vorgänge über stochastische Prozesse beschreiben, mit denen durch Mittelwertbildung ein Übergang auf makroskopische Stoffgesetze möglich ist.

Zur Unterstützung dieser Modellbildung können Simulationen der Prozesse im Mikrobereich nützlich sein, bei denen wegen des Vielteilchencharakters der Vorgänge Modelle in Form zellulärer Automaten und molekulardynamische Ansätze hergezo-gen werden können.

## Danksagung

Die Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 319 „Stoffgesetze für das inelastische Verhalten metallischer Werkstoffe – Entwicklung und technische Anwendung“ gefördert, der hierfür gedankt sei. Wesentliche Beiträge wurden von den Mitarbeitern des Instituts für Allgemeine Mechanik und Festigkeitslehre der Technischen Universität Braunschweig Dr.-Ing. Hanfried Hesselbarth und Dipl.-Ing. Daryoush Sangi geleistet.

## Literatur

- 1 Guy, A.G., G. Petzow: Metallkunde für Ingenieure, Akademische Verlagsgesellschaft Wiesbaden, 1983.
- 2 Steck, E.: A Stochastic Model for High-Temperature Plasticity of Metals, Int. J. of. Plasticity 1, 1985.
- 3 Schlums, H.: Ein stochastisches Werkstoffmodell zur Beschreibung von Kriechen und zyklischem Verhalten metallischer Werkstoffe, Braunschweig Series on Mechanics, No. 5–1992, Mechanik-Zentrum, Technische Universität Braunschweig.
- 4 Thielecke, F.: Untersuchung von Verfahren zur Parameteranpassung bei Stoffgesetzen für inelastisches Verhalten metallischer Werkstoffe, Diplomarbeit, Institut für Allgemeine Mechanik und Festigkeitslehre der TU Braunschweig, 1992.
- 5 Wolfram, S.: Universality and complexity in cellular automata, Physica 10 D, 1984, 1–35.
- 6 Hesselbarth, H.: Simulation von Versetzungsstrukturbildung, Rekristallisation und Kriechschädigung mit dem Prinzip der zellulären Automaten, Braunschweig Series on Mechanics, Nr. 4–1992, Mechanik-Zentrum, Technische Universität Braunschweig.
- 7 Von Neumann, J.: Theory of self-reproducing automata (Hrsg.: A.W. Burks) University of Illinois Press, Urbana, 1966.

Professor Dr.-Ing. Elmar Steck

Institut für Allgemeine Mechanik und Festigkeitslehre der Technischen Universität Braunschweig  
Gaußstraße 14 · 38106 Braunschweig



HERBERT OERTEL, Karlsruhe

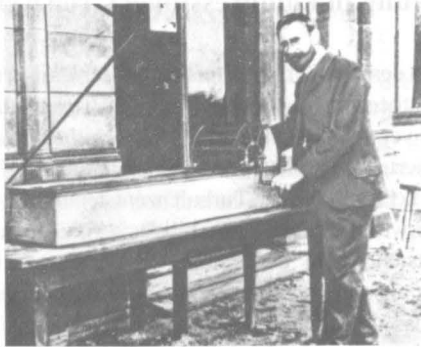
## **Turbulenzentstehung in kompressiblen Grenzschichtströmungen**

Der Vortrag zu Ehren des diesjährigen Preisträgers der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille behandelt die stabilitätstheoretischen Grundlagen der Turbulenzentstehung in Grenzschichtströmungen. Wir verzichten dabei auf jegliche mathematischen Ableitungen und verweisen den interessierten Leser auf unsere Fachliteratur [1–7]. Der Artikel beginnt mit den klassischen Erkenntnissen zur Turbulenzentstehung in einer inkompressiblen Plattengrenzschicht. Es werden dann die Stabilitätstheorie und die verschiedenen Stadien der Turbulenzentstehung in der kompressiblen Grenzschicht erläutert. Dabei werden die Begriffe der absoluten und konvektiven Instabilität eingeführt, die letztendlich die Grundlage für das Verständnis des laminar-turbulenten Übergangs in der dreidimensionalen Grenzschicht eines transsonischen Tragflügels für Verkehrsflugzeuge eröffnen.

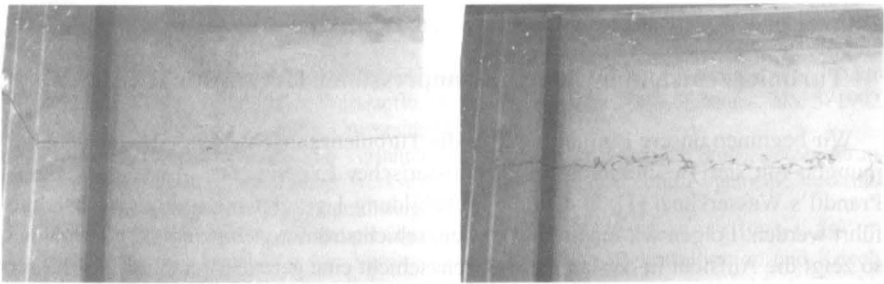
### **Turbulenzentstehung in der inkompressiblen Grenzschichtströmung**

Wir beginnen unsere Einführung über die Turbulenzentstehung in Grenzschichtströmungen mit der Beschreibung einiger historischer Experimente. Ausgangspunkt ist Prandtl's Wasserkanal [1], in dem die in Abbildung 1 gezeigten Experimente durchgeführt werden. Folgen wir einem in die Grenzschichtströmung eingebrachten Farbfaden, so zeigt die Aufsicht in der laminaren Grenzschicht eine gerade Streichlinie. In der turbulenten Grenzschichtströmung beobachten wir eine Durchmischung des Farbfadens aufgrund des zusätzlichen turbulenten Querimpulsaustausches. Dieses berühmte Experiment hat Reynolds veranlaßt, für die mathematische Beschreibung einen Ansatz, bestehend aus der zeitgleich gemittelten Grundströmung und den turbulenten Schwankungsgrößen, zu wählen. Dieser Reynoldssche Ansatz führt letztendlich zu den Reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen für die inkompressible turbulente Strömung und zu den Favre-gemittelten Grundgleichungen für die kompressible turbulente Strömung. Prandtl's Grenzschichttheorie [1] führt diese zeitlich- bzw. massengemittelten Grundgleichungen in die entsprechenden Grenzschichtgleichungen für turbulente Grenzschichtströmungen über [5, 6].

Damit haben wir mit wenigen Worten den Weg zur Berechnung turbulenter Grenzschichtströmungen skizziert. Dabei haben wir aber noch nichts über die Einzelheiten der Turbulenzentstehung in der Grenzschicht gelernt. Dazu betrachten wir die Prinzipskizze der Abbildung 2. Der laminar-turbulente Übergang setzt in der Plattengrenzschicht mit zweidimensionalen Tollmien-Schlichting-Wellen (TS) ein, die mit einer bestimmten Phasengeschwindigkeit stromab wandern. Dabei werden aufgrund sekundärer Instabilitäten dreidimensionale Störungen überlagert, die zu sogenannten  $\lambda$ -Wirbeln führen, in deren Spitzen sich über Turbulenzflecken der Übergang zur turbulenten Grenzschichtströmung vollzieht.



L. Prandtl's Wasserkanal [1]



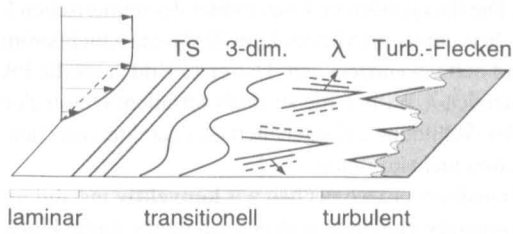
Farbfäden in der laminaren und turbulenten Grenzschichtströmung

Abb. 1:

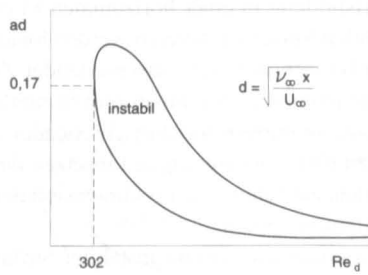
*Experimente zum laminar-turbulenten Übergang in einer Grenzschichtströmung*

Das Einsetzen der Tollmien-Schlichting-Instabilität läßt sich mit der klassischen Orr-Sommerfeld-Stabilitätsanalyse für harmonische Wellen berechnen [5, 7]. Das Stabilitätsdiagramm zeigt die dimensionslose Wellenzahl in Abhängigkeit der für die Instabilität charakteristischen dimensionslosen Kennzahl  $Re_d$  (Verhältnis Trägheit zur Reibung). Innerhalb des gekennzeichneten Stabilitätsbereiches sind harmonische Störwellen instabil. Bewegen wir uns mit der Längskoordinate  $x$  stromab, so treffen wir die Neutralkurve des Stabilitätsdiagramms mit wachsender Reynoldszahl bei dem kritischen Wert 302. Dazu gehört die kritische Wellenzahl der harmonischen Störwelle von 0.17. Stromab sind in dem gekennzeichneten Wellenzahlbereich die Störwellen instabil und leiten den Übergang zur turbulenten Grenzschichtströmung ein.

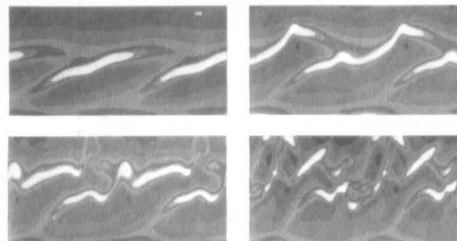
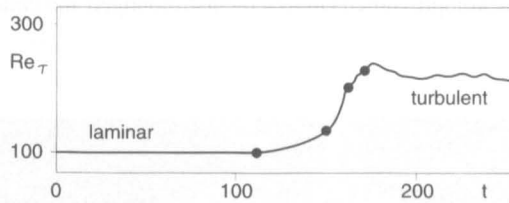
Die einzelnen Stadien des nichtlinearen Transitionsprozesses im instabilen Bereich diskutieren wir anhand einer numerischen Lösung [7]. In Abhängigkeit der numerischen Simulationszeit, die der Koordinate  $x$  stromab entspricht, ist die dimensionslose Wandschubspannung aufgetragen. Im laminaren Bereich der Grenzschicht berechnen wir einen konstanten Wert. Im Übergangsbereich steigt die Wandschubspannung und damit



Prinzipische Skizze des laminar-turbulenten Übergangs in der Platten-Grenzschichtströmung



Stabilitätsdiagramm



Dimensionslose Wandschubspannung und lokale Scherschichten im Mittelschnitt der Grenzschicht

Abb. 2:  
Turbulenzentstehung in einer inkompressiblen Grenzschichtströmung

der Widerstand an. Die dazugehörigen Einzelbilder der numerischen Lösung zeigen eine Komponente des Schervektors im Mittelschnitt der Grenzschichtströmung. Die Bereiche hoher Scherung sind hell gekennzeichnet. Das erste Bild zeigt die lokalen Scherschichten der sich ausbildenden  $\lambda$ -Wirbel, die stromab zerfallen. Dieser Zerfallsprozeß, der in den Einzelbildern der Abbildung 2 festgehalten ist, charakterisiert den Transitionsprozeß zur turbulenten Grenzschichtströmung.

Einen solchen Transitionsprozeß nennen wir **konvektiv** instabil im Gegensatz zu **absolut** instabilen Strömungsbereichen, in denen ein momentaner Umschlag zur turbulenten Strömung stattfindet. Dies sind zwei neue Begriffe, die für die weitere Diskussion der Turbulenzentstehung von entscheidender Bedeutung sein werden. Die Abbildung 3 veranschaulicht die Begriffsbildung in einer horizontalen Ebene der Grenzschichtströmung. Im konvektiv instabilen Strömungsbereich werden lokal eingebrachte Störungen stromab geschwemmt und beeinflussen mit fortschreitender Zeit nicht den ursprünglichen Ort der Störung (Plattengrenzschicht). Im absolut instabilen Strömungsbereich beeinflussen lokal eingebrachte Störungen mit fortschreitender Zeit den gesamten Strömungsbereich. Dies führt zu einem schlagartigen Einsetzen der Turbulenz, den wir bei der Diskussion der Turbulenzentstehung in dreidimensionalen kompressiblen Grenzschichtströmungen kennenlernen werden.

Für das Auffinden konvektiver und absolut instabiler Strömungsbereiche haben wir eine neue Theorie lokaler Störungen entwickelt, die die klassische Orr-Sommerfeld Stabilitätsanalyse harmonischer Wellen ablöst. Die Theorie lokaler Störungen werden wir im folgenden auf die kompressiblen Grenzschichtströmungen anwenden [2, 3].

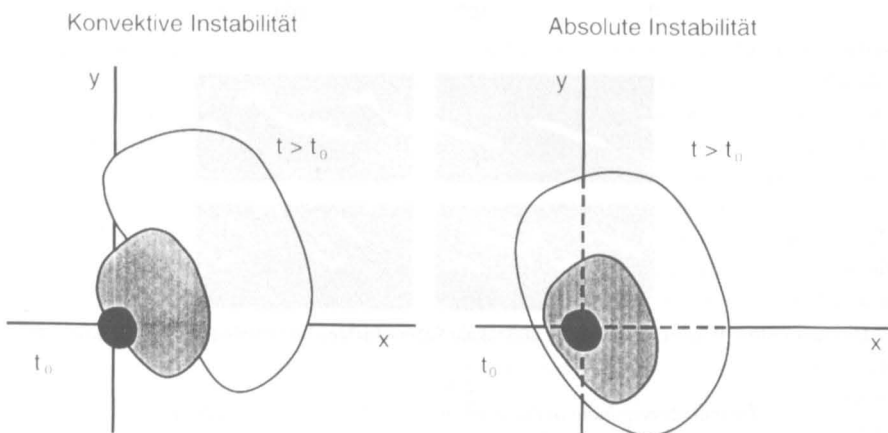
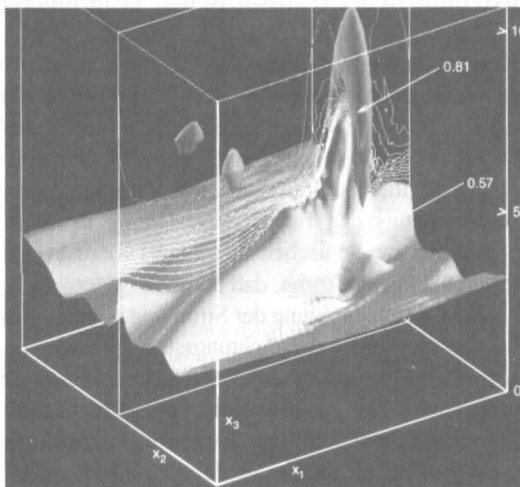
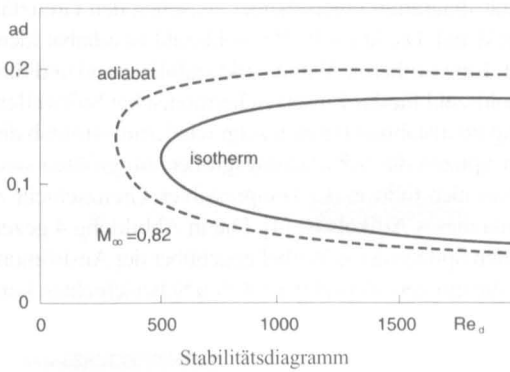
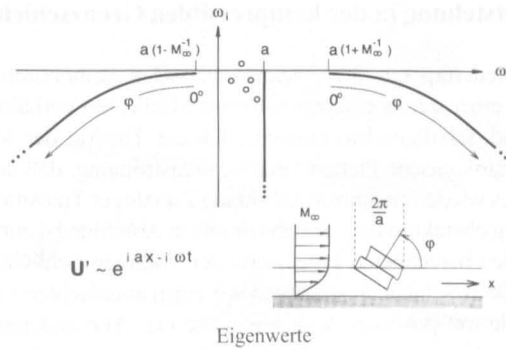


Abb. 3:  
Konvektive und absolute Instabilität



Isomachlinien im Transitionsbereich

Abb. 4:  
Turbulenzentstehung in einer kompressiblen Grenzschichtströmung

## **Turbulenzentstehung in der kompressiblen Grenzschichtströmung**

Wir beginnen wiederum mit der zweidimensionalen kompressiblen Plattengrenzschichtströmung bei einer transsonischen Anström-Machzahl (Verhältnis von Anströmgeschwindigkeit und Schallgeschwindigkeit). Unsere Theorie der lokalen Störungen zeigt auch für die transsonische Platten-Grenzschichtströmung, daß diese konvektiv instabil ist. Damit ist es wiederum ein zur Abbildung 2 analoger Transitionsprozeß, der die Turbulenzentstehung charakterisiert. Sehen wir uns in Abbildung 4 zunächst die mit harmonischen Störwellen berechneten Eigenwerte der Tollmien-Schlichting-Instabilität in der kompressiblen Grenzschicht an, erkennen wir einen angefachten Eigenwert (Tollmien-Schlichting-Welle mit positiver Anfachsungsrate  $\omega_i$ ). Alle anderen viskosen Eigenwerte einschließlich der akustischen Wellen sind bei transsonischen Machzahlen gedämpft. Das Stabilitätsdiagramm unterscheidet zwischen den Grenzfällen einer adiabaten bzw. isothermen Wand. Die kritische Reynoldszahl ist adiabat identisch mit dem inkompressiblen Wert. Eine isotherme Wand wirkt stabilisierend und führt zu einer größeren kritischen Reynoldszahl für das Einsetzen harmonischer Störwellen. Die numerische Simulationsrechnung im instabilen Bereich zeigt wiederum stromab die Ausbildung von  $\lambda$ -Wirbeln, in deren Spitzen die Schwankungsgrößen am größten sind. Diese Schwankung der Strömungsgrößen führt in der kompressiblen Grenzschicht zur Schallabstrahlung, die nicht Thema dieses Artikels ist [4]. Die in Abbildung 4 gezeigten Isomachflächen zeigen, daß in den Spitzen der  $\lambda$ -Wirbel gegenüber der Anströmung Übergeschwindigkeiten auftreten, die mit dem Zerfall der lokalen Scherschichten korreliert sind.

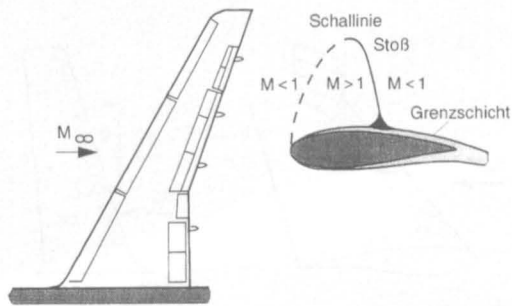
## **Turbulenzentstehung in der transsonischen Tragflügelgrenzschicht**

Das besondere Interesse an der Turbulenzentstehung in dreidimensionalen kompressiblen Grenzschichtströmungen kommt aus der Luftfahrt. Hier werden derzeit Studien über zukünftige Großraumflugzeuge ausgearbeitet. Da eine turbulente Grenzschichtströmung einen größeren Widerstand als eine laminare aufweist, ist man bestrebt, die Technologie der Laminarisierung auch bei transsonischen Verkehrsflugzeugen einzusetzen. Dies setzt jedoch die Kenntnis der Turbulenzentstehung in der dreidimensionalen Grenzschicht eines gepfeilten transsonischen Tragflügels voraus.

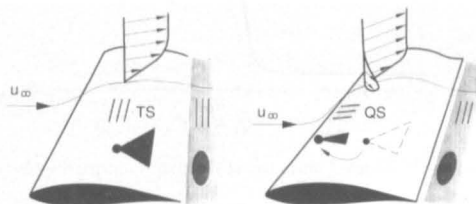
Die Prinzipskizze der Abbildung 5 zeigt, daß bei einer transsonischen Anströmmachzahl von 0.82 aufgrund der Beschleunigung der Strömung auf dem Tragflügel ein Überschallgebiet entsteht, das von einem Verdichtungsstoß (Drucksprung) abgeschlossen wird. Dieser erzeugt zusätzlichen Widerstand. Um den Drucksprung und damit die Widerstandserhöhung möglichst gering zu halten, ist man zu gepfeilten Tragflügeln übergegangen, die die lokale Anströmmachzahl am Profil entsprechend der freien Anströmmachzahl reduzieren. Der Nachteil dieser gepfeilten Tragflügel ist jedoch, daß die Grenzschichtströmung auf dem Tragflügel dreidimensional wird, was bezüglich unseres Themas seine Auswirkung hat. Aufgrund der Pfeilung des Tragflügels tritt in der dreidimensionalen Grenzschicht oberhalb eines kritischen Pfeilwinkels eine weitere Instabili-



Studie eines zukünftigen Großraumflugzeuges, Deutsche Airbus 1994

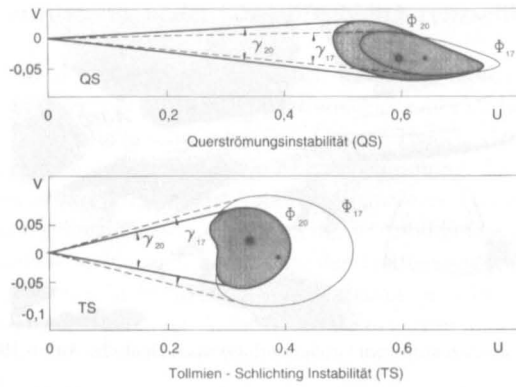


Prinzipskizze des transsonischen Tragflügels

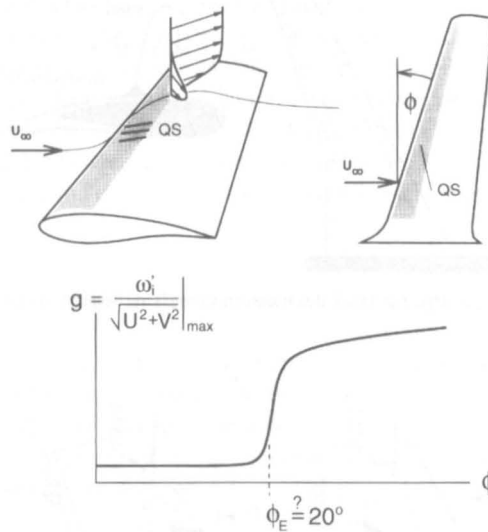


Turbulenzentstehung durch Tollmien-Schichten (TS) und Querströmungsinstabilitäten (QS) auf dem transsonischen Tragflügel

Abb. 5:  
Transsonischer Tragflügel eines Verkehrsflugzeuges



Instabile Bereiche auf dem Tragflügel



Kritischer Pfeilwinkel eines transsonischen Laminarflügels

Abb. 6:  
Ein Auslegungskriterium für den transsonischen Laminarflügel



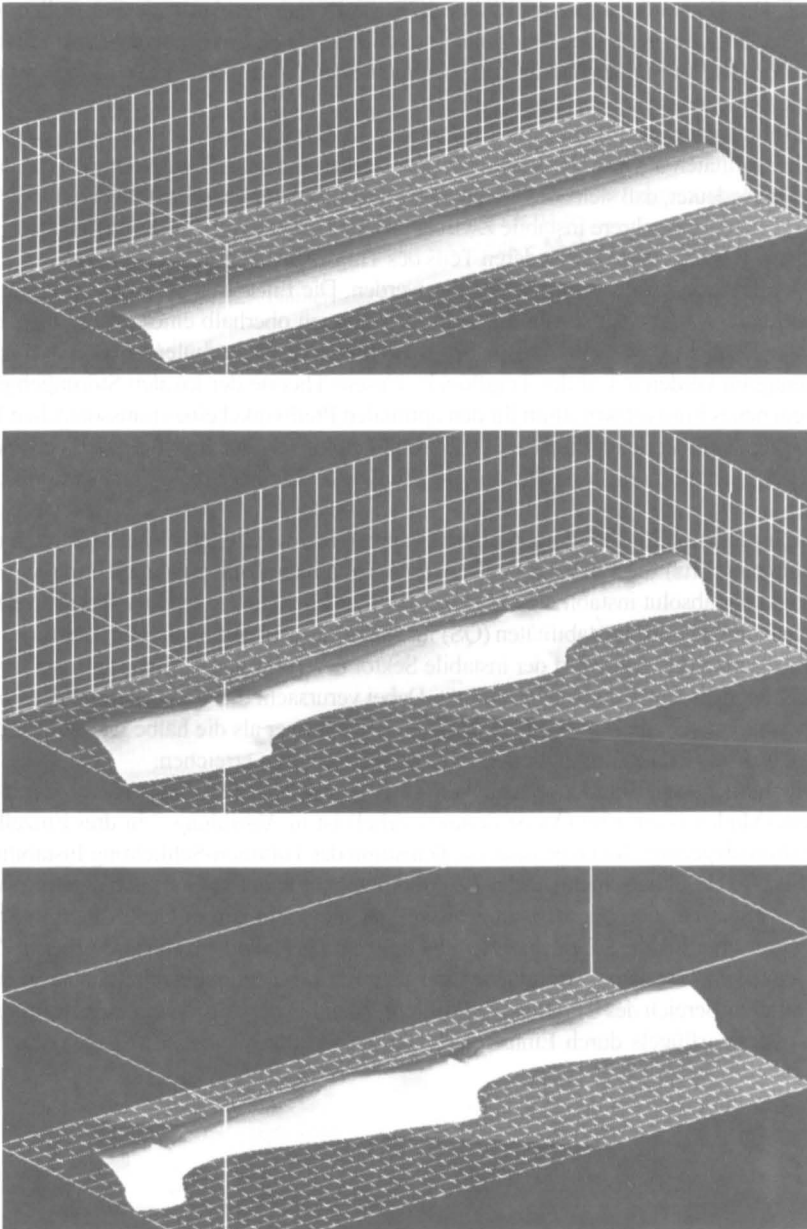


Abb. 7:  
*Zerfall der Querströmungswirbel (0-Hertz-Mode der Querströmungsinstabilität)  
in der Tragflügel-Grenzschichtströmung*

tät auf. Die Querströmungsinstabilitäten (QS) sind wiederum laufende Störwellen, die sich jetzt längs des gepfeilten Tragflügels mit charakteristischen Phasengeschwindigkeiten ausbreiten und ergänzend zu den Tollmien-Schlichting-Wellen den Übergang zur turbulenten Grenzschichtströmung einleiten.

Unsere Theorie der Wellenpaket-Störungen [2, 3] zeigt, daß die Tollmien-Schlichting-Instabilitäten auch in der kompressiblen Grenzschichtströmung konvektiv instabil sind. Das bedeutet, daß sich der Übergang zur turbulenten Grenzschicht in einem Transitionsbereich über mehrere instabile Zwischenstadien vollzieht. Diese können durch eine geeignete Konturierung des vorderen Teils des Tragflügels zumindest bis zum Auftreten des Verdichtungsstoßes stromab gedrängt werden. Die Entstehung der Querströmungsinstabilitäten ist dagegen absolut instabil. Diese setzen oberhalb eines kritischen Pfeilwinkels schlagartig ein und verursachen den Umschlag zur turbulenten Grenzschichtströmung im vorderen Teil des Tragflügels. Unsere Theorie der lokalen Störungen gibt also ein neues Entwurfskriterium für den optimalen Pfeilwinkel eines transsonischen Laminarflügels für Verkehrsflugzeuge. Die Abbildung 6 weist nach, daß für die Verhinderung der Querströmungsinstabilitäten ein Pfeilwinkel kleiner als  $20^\circ$  realisiert werden muß.

Ergänzend sind in Abbildung 6 in der Gruppengeschwindigkeits-Ebene (Bereich des Energietransports) die Bereiche der konvektiv instabilen Tollmien-Schlichting-Wellen (TS) und der absolut instabil einsetzenden, stromab aber auch konvektiv instabil zerfallenden Querströmungsinstabilitäten (QS) für zwei Pfeilwinkel eingetragen. Beim kleineren Pfeilwinkel  $17^\circ$  dominiert der instabile Sektor der Tollmien-Schlichting-Instabilität, bei  $20^\circ$  der der Querströmungsinstabilität. Dabei verursacht die Vergrößerung des Pfeilwinkels um nur  $3^\circ$ , daß ein Wellenpaket nur noch weniger als die halbe Laufstrecke benötigt, um die gleiche Amplitudenvergrößerung stromab zu erreichen.

Die numerische Simulation des konvektiv instabilen Zerfallsprozesses der sog. 0-Hertz-Moden (stationäre Querströmungswirbel) ist in Abbildung 7 in drei Einzelbildern stromab gezeigt. Im Gegensatz zur Transition der Tollmien-Schlichting Instabilität, die über lokale Scherschichten und  $\lambda$ -Wirbeln zur turbulenten Grenzschichtströmung führt, werden bei der Querströmungsinstabilität die stationären Querströmungswirbel wiederum über lokale Scherschichten unterteilt und zerfallen stromab. Da dieser Zerfallsprozeß und der damit verbundene Übergang zur turbulenten Grenzschichtströmung im vorderen Bereich des Tragflügels geschieht, ist er bei der Auslegung eines transsonischen Laminarflügels durch Einhalten des kritischen Pfeilwinkels ( $20^\circ$ ) unbedingt zu vermeiden.

**Ergänzende Literatur:**

- [1] Prandtl, L.: Über Flüssigkeitsbewegungen bei sehr kleiner Reibung. Gesammelte Abhandlungen. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 575–584, 1961.
- [2] Oertel jr., H.: Bereiche der reibungsbehafteten Strömung. Z. f. Flugwiss. 19 (1995) 119–128.
- [3] Oertel jr., H.; Delfs, J.: Mathematische Analyse der Bereiche reibungsbehafteter Strömungen. ZAMM, Z. angew. Math. Mech. 75 (1995) 7, 491–505.
- [4] Delfs, J.: Numerische Simulation der transitionellen schallnahen Plattengrenzschichtströmung. Techn. Universität Braunschweig, Dissertation 1994, ZLR 94-05.
- [5] Oertel, jr., H.; Böhle, M.; Ehret, T.: Strömungsmechanik – Methoden und Phänomene. Springer, Berlin/Heidelberg, 1995.
- [6] Oertel jr., H.; Laurien, E.: Numerische Strömungsmechanik. Springer, Berlin/Heidelberg 1995.
- [7] Oertel jr., H.; Delfs, J.: Strömungsmechanische Instabilitäten. Springer, Berlin/Heidelberg 1996.

---

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Oertel jr.  
Institut für Strömungslehre und Strömungsmaschinen der Universität Karlsruhe  
Kaiserstraße 12 · 76128 Karlsruhe



EDWIN KREUZER, Hamburg-Harburg

## Chaostheorie – nützlich oder vergänglich?

*Chaos ist das Wort mit der weltweit größten Wertsteigerung*, so schrieb DER SPIEGEL, Brügge (1993), am Beginn seiner dreiteiligen Serie „Kult um das Chaos“ mit dem Untertitel „Aberglaube oder Welterklärung?“. In dieser Serie finden sich viele harsche Wort für die unseriösen Protagonisten der Chaostheorie. Viele erliegen in der Tat der Faszination prächtig falscher „Chaosdarstellungen“.

Viele reden und schreiben über die Chaostheorie: Mathematiker und Physiker, Ingenieure und Biochemiker, Ökologen und Mediziner und sogar Sozialwissenschaftler. Und wenn so viele darüber reden, dann ist es nicht erstaunlich, daß sogar Komponisten, Dichter, Tänzer, Psychologen und auch Manager davon angesteckt werden. Wenn so viele darüber reden, dann ist es klar, daß nicht alle, die es tun, auch etwas davon verstehen. Aber sie tun es trotzdem, und damit sind wir beim Problem. Chaostheorie beschreibt keine „wissenschaftliche Revolution“. Der Begriff „Chaostheorie“ erweckt genauso falsche Assoziationen wie der Begriff „Katastrophentheorie“.

Mit dem Artikel „Chaos, Fraktale und das Bild der Mathematik in der Öffentlichkeit“ stellt der Mathematiker Steffen (1994) sehr kritisch Beiträge zur Chaostheorie an den Pranger. Man muß seine Wertung nicht teilen, sie mag vielen gar provokativ überzogen vorkommen, aber er hat sicher manche besonders verwegene Deutungen, Spekulationen und Auswüchse zu Recht aufs Korn genommen.

Das Thema Chaos hat viele Facetten und so auch die dazu erschienenen Publikationen. Die Bandbreite an umfangreicher, lesenswerter Literatur deutscher Autoren aus dem Bereich der Ingenieurwissenschaften reicht von Argyris u.a. (1994) bis Straub (1990).

Ich will mich heute weder mit Steffens zum Teil beißender Kritik beschäftigen und auch nicht in den Kreis leidenschaftlicher Befürworter einreihen, sondern über meine nunmehr über fünfzehnjährige Erfahrung mit dem Thema „Chaostheorie“ berichten.

Für den Tübinger Biochemiker Otto Rössler ist der altgriechische Philosoph Anaxagoras der Urvater der Chaostheorie. Das könnte ein Beleg dafür sein, daß Chaos die Menschheit schon lange beschäftigt. Auch Leonardo da Vinci war von diesem Phänomen offenbar fasziniert, wie einige seiner Zeichnungen errahnen lassen, Bild 1. Ich finde mich also in guter Gesellschaft!

## Das Problem mit Vorhersagen und Prognosen

In die Zukunft sehen zu können, ist ein uralter Wunschtraum der Menschheit. In dem Bemühen, aus dem Gestern und Heute Aufschluß über das Morgen zu erlangen, haben Wissenschaftler die Propheten und Wahrsager abgelöst. Geheimnisvolle Weissagungen



Bild 1:

*Das Chaos ist der ungeordnete Urstoff! Leonardos wissenschaftliche Zeichnungen von bewegtem Wasser gelten mit Recht als Kunstwerke. Mit der hier wiedergegebenen Zeichnung stellt er einen Wasserstrahl dar, der sich aus einer viereckigen Öffnung in ein Becken ergießt und ein Gebilde von Blasen und Strudeln erzeugt. Die Zeichnung entstand vermutlich um 1507 im Zusammenhang mit einem hydraulischen Projekt in Mailand, Reti (1974).*

und kryptische Orakelsprüche sind nüchternen Prognosen gewichen, Bammé und Kotzmann (1989).

Die naturwissenschaftliche Methode, Voraussagen zu treffen, hat nichts Mystisches mehr an sich. Zuerst wird das zu untersuchende Phänomen auf seine zentralen, quantitativ meßbaren Parameter reduziert. Dann werden die wesentlichen mathematischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern bestimmt und in Form von (Differential- bzw. Differenzen-) Gleichungen formuliert. Sind die Parameter, möglicherweise in ihrem zeitlichen Verlauf, und die Anfangsbedingungen bekannt, dann steht einer Prognose nichts mehr im Wege: Man messe die Anfangsbedingungen und setze diese sowie die Zahlenwerte der Parameter in die Gleichungen ein und berechne den zeitlichen Verlauf der Funktionen, Bild 2.

Wissenschaftler sind von Berufs wegen Minimalisten. Nicht weil sie faul sind, sondern weil die Wirklichkeit nie vollständig in Modellen erfaßt werden kann. Vielfach ist man sogar gezwungen, stark zu vereinfachen, da nur dann überhaupt eine mathematische Analyse möglich ist. Das generelle Motto der Projektion der Wirklichkeit auf ein Modell, der Abstraktion also, ist:

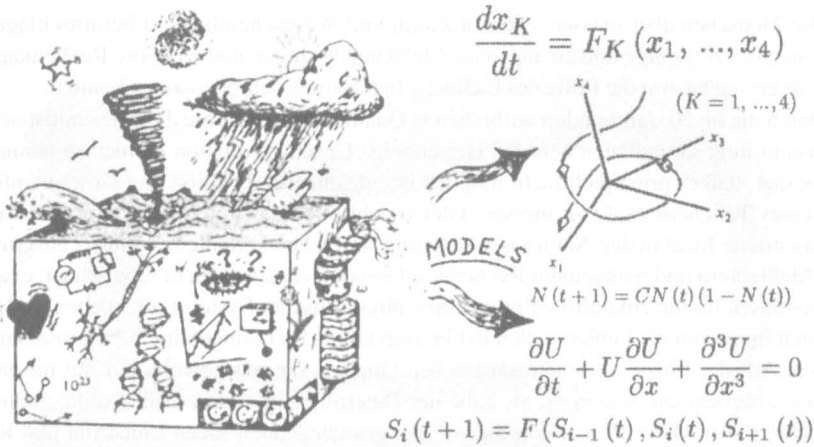


Bild 2:

Die Dynamik der realen Welt wird projiziert auf mathematische Modelle, die durch Gleichungen repräsentiert werden. Der Modellbildungsprozeß muß auf fundierten und überprüften mathematischen Prinzipien aufbauen und darf sich nicht im Phänomenologischen erschöpfen. Ein Modell wird aber keinesfalls ein vollständiges Abbild der Wirklichkeit sein. Bild nach Jackson (1989).

„Mache ein Modell so grob wie möglich und nur so fein wie unbedingt nötig!“

Oder mit den Worten von Albert Einstein: „Alles sollte so einfach wie möglich gemacht werden, aber nicht einfacher.“

Prognosen sind dann aber nur so gut, wie das Modell die Wirklichkeit erfäßt. Vorhersagen, die den Anspruch erheben, mehr zu können, als durch das Modell gedeckt ist, sind nicht seriös und entbehren dem wissenschaftlichen Anspruch. Sie gehören in den Bereich der Spekulation.

### Der „Laplacesche Dämon“ oder „Gott würfelt nicht!“

Seit Kepler und Newton, d. h. über drei Jahrhunderte hinweg, war die Forschung wohl eher unbewußt auf Regelmäßigkeit ausgerichtet. Man war nur an regulären Bewegungen, seien sie linearer oder nichtlinearer Natur, interessiert (Poincaré war eine Ausnahme).

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts hat der französische Mathematiker und Physiker Pierre-Simon Laplace die vorher beschriebene Methode der Voraussage als weltanschauliches Prinzip formuliert. Er sprach von einer überirdischen Intelligenz (der Begriff des Dämons wurde wohl erst von E. Du Bois-Reymond geprägt): Wenn ein Wesen imstande wäre, die Lage, die Geschwindigkeit und den Impuls aller Massen, aus denen das Universum besteht, zu messen und dieses Zahlenmaterial in entsprechenden Gleichungen zu verarbeiten, dann könnte er den Zustand des Universums zu jedem Zeitpunkt der Vergangenheit und der Zukunft exakt bestimmen. Der Determinismus, geboren bei Newton und Leibniz, war auf seinem Höhepunkt.

Die Menschen aber müssen sich mit Zufall und Wahrscheinlichkeit herumschlagen, weil sie über zu wenige und zu ungenaue Meßdaten verfügen und weil ihre Rechenkapazität zu gering ist, um die Rolle des Laplaceschen Dämons einnehmen zu können.

Durch die im 20. Jahrhundert aufblühende Quantentheorie wurde die deterministische Weltsicht ihrer Grundlagen beraubt. Heisenbergs Unschärferelation ist hier zu nennen, die besagt, daß es prinzipiell nicht möglich ist, gleichzeitig Position und Geschwindigkeit eines Teilchens exakt zu messen. Gleichwohl blieb das durch den Determinismus repräsentierte Ideal in den Naturwissenschaften weitgehend erhalten. Wenn es aufgrund von Meßfehlern und mangelnder Rechengeschwindigkeit schon nicht möglich ist, exakte Prognosen für die zukünftige Entwicklung physikalischer Systeme abzugeben, so lassen sich immerhin die Fehlerquellen in Grenzen halten und „ungefähre“ Prognosen aufstellen. Auf der Ebene der makroskopischen Objekte, die wir gewöhnlich mit unseren Sinnen wahrnehmen, schien es, als habe der Determinismus seine Gültigkeit behalten, Arecchi (1989). Diese Prognosen, die auf den grundlegenden Ideen Linearität und Reversibilität beruhen, genügen für die meisten technischen Anwendungsgebiete vollauf. Notfalls müssen die Messungen eben präzisiert und neue Rechentechniken entwickelt werden. Dieser Anschauung liegt eine abgeschwächte Variante des Laplaceschen Dämons zugrunde: Aus den ungefähren Ausgangsdaten läßt sich die künftige Entwicklung eben nur mit begrenzter Genauigkeit berechnen. Oder positiver formuliert: Ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkung.

### **Linear kontra nichtlinear**

Wurde ein Verhalten beobachtet, das diesen Regeln nicht folgte, dann wurde trotzdem das Prinzip nicht in Frage gestellt. Aber wir alle wissen, daß es immer wieder Ereignisse gibt, die scheinbar nicht vorhersehbar sind: etwa die Aktienkurse der Börse oder die Hochs und Tiefs der Wetterentwicklung.

Für Systeme, die nach deterministischen Gesetzen funktionieren, gilt, daß aus dem Systemzustand zu einer bestimmten Zeit das zukünftige Verhalten des Systems vorausberechnet werden kann. Aber selbst die einfachsten nichtlinearen Systeme – und praktisch alle Systeme der Realität gehorchen nichtlinearen Gesetzen – machen Vorhersagen extrem schwierig. Die Welt ist nichtlinear!

Dabei kann scheinbar Ordnung plötzlich an die Stelle von Chaos treten und umgekehrt. Wir beobachten sogar, daß in den meisten Systemen Ordnung und Chaos dicht beieinander liegen. Schlimmer noch könnte man sagen, es gibt häufig Situationen, bei denen leichte Störungen über regelmäßiges oder unregelmäßiges Verhalten entscheiden, Bild 3.

Es zeigt sich offensichtlich folgendes:

1. Sehr kleine Ursachen können große, überproportionale Wirkungen haben. Das kennzeichnet alle nichtlinearen Systeme im Gegensatz zu linearen Systemen, bei denen Ursache und Wirkung proportional zueinander sind.



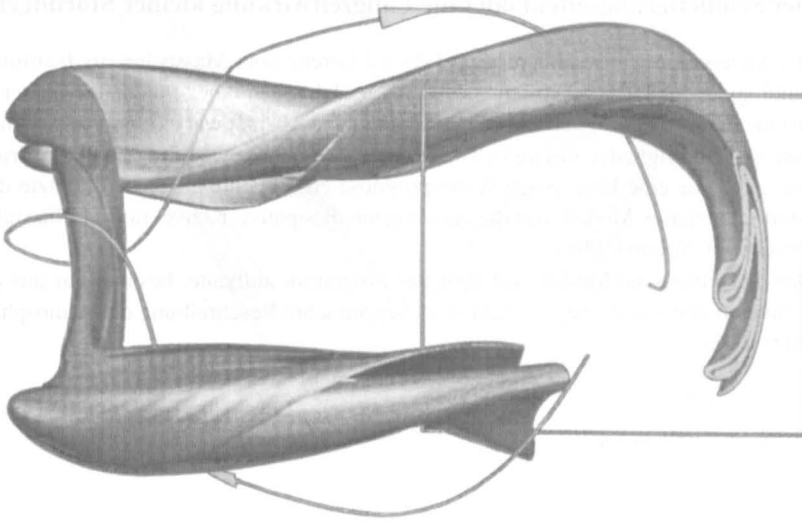


Bild 3:

Ein wichtiges Merkmal nichtlinearer dynamischer Systeme ist die Koexistenz unterschiedlicher Bewegungsformen. Das Bild gibt für die von Duffing (1918) angegebene Differentialgleichung eines nichtlinearen Schwingers eine unregelmäßige, chaotische Bewegung und eine periodische Bewegung wieder. Die chaotische Bewegung wird von einer unendlich langen Linie gebildet, die einen undurchdringlichen Strang komplexer geometrischer Struktur formt. Zur besseren Darstellung wurde der Strang durch einen Körper ersetzt, dem ein Sektor entnommen ist. Der Anfangszustand entscheidet, ob die Bewegung einen regelmäßigen oder unregelmäßigen Verlauf nimmt. Bild aus Kreuzer u. a. (1991).

2. Ein Versuch kann ganz einfachen, durchschaubaren Regeln folgen und trotzdem scheinbar nicht berechenbare Ergebnisse hervorbringen.

Die Entwicklung neuer, präziserer Meßtechniken und die Potenzierung menschlicher Rechenfähigkeiten durch den Computer verhießen der Wissenschaft weitere Erfolge in ihrem Bemühen, die Zukunft vorausberechnen zu können. Besonders die Meteorologen konnten hoffen, durch das immer dichter werdende Netz von Bodenmeßstationen und Wettersatelliten sowie durch den Einsatz immer leistungsfähigerer Computer genauere Wettervorhersagen treffen zu können. Die wirkliche Situation war aber verwirrend, ja geradezu paradox. Die Wissenschaft war in der Lage, Planeten- und Kometenbewegungen für Jahrhunderte vorauszubestimmen oder Astronauten sicher von der Erde auf den Mond und zurückzubringen, scheiterte aber häufig bei der Wettervorhersage für die nächsten Tage; von langfristigen Vorhersagen ganz zu schweigen.

## Der Schmetterlingseffekt oder die Langzeitwirkung kleiner Störungen

Der Meteorologe und Mathematiker Edward Lorenz vom Massachusetts Institute of Technology in den USA hat Anfang der sechziger Jahre damit begonnen, das Wetter mit Hilfe eines Computerprogramms zu simulieren. Seine Absicht war es herauszufinden, ob es trotz der Zufälligkeiten des täglichen Wettergeschehens gewisse regelmäßige Grundmuster gäbe, die eine langfristige Wetterprognose ermöglichen. Lorenz benutzte dazu ein stark reduziertes Modell, das die erzwungene dissipative Konvektion in Flüssigkeiten beschreibt, Straub (1990).

Das mathematische Modell, auf dem das Programm aufbaute, bestand nur aus drei Gleichungen und war damit eine sehr stark vereinfachte Beschreibung der Atmosphäre, Lorenz (1963):

$$\dot{x} = \sigma(y - x),$$

$$\dot{y} = -xz + rx - y,$$

$$\dot{z} = xy - bz.$$

Darin sind  $\sigma$ ,  $r$  und  $b$  positive Parameter; für  $r = 28$ ,  $\sigma = 10$  und  $b = 8/3$  zeigen die Simulationen sich nicht schließende Bahnkurven, Bild 4. Die Ergebnisse gaben Hinweise auf die Dynamik des Wettergeschehens. So oft Lorenz die Prozedur am Computer auch wiederholte: es gab zwar gewisse Grundmuster, die sich stets wiederholten, aber nie zweimal in genau derselben Weise. Immer waren die Muster durchsetzt von Störungen, gleichsam eine geordnete Unordnung.

Natürlich war Lorenz auch an längeren Wettersequenzen interessiert. Er wollte den Vorgang abkürzen und griff deshalb auf Daten einer bereits früher berechneten Sequenz zurück: Er begann die Computersimulation mit Parametern und Anfangsbedingungen aus der Mitte einer älteren Sequenz. Die Werte übernahm er mit einer Genauigkeit von drei Dezimalstellen hinter dem Komma. Das entsprach einer höheren Genauigkeit, als mit der Meteorologen gewöhnlich arbeiten.

Das Wetter wird in einem Computer streng deterministisch durch ein System mathematischer Gleichungen gesteuert. Aufgrund der Wahl seiner Ausgangsdaten mußte daher die neue Sequenz nach allen bisherigen Erfahrungen mit dem bekannten alten Verlauf übereinstimmen. Zu seinem Erstaunen stellte Lorenz fest, daß dem nicht so war. Nur kurz folgte die neue Sequenz ungefähr der alten, um dann einen völlig anderen Verlauf zu nehmen. Was war geschehen? Lorenz hielt eine Genauigkeit von drei Dezimalstellen für ausreichend; sein Computer aber rechnete intern mit einer höheren Genauigkeit, nämlich mit Zahlen bis zur sechsten Dezimalstelle.

Wenn also Lorenz zum Beispiel 0,293 eingab, der genaue Wert der alten Sequenz aber 0,293123 war, so startete der Computer also nicht mit demselben Anfangswert, sondern mit einem um 0,000123 kleineren.

Nach dem Prinzip – ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkungen – hätte dieser winzige Fehler keine Rolle spielen dürfen. Eine solche minimale numerische Abweichung hätte in ihrer Wirkung allenfalls einem leichten Windstoß, einem kaum spürbaren Hauch

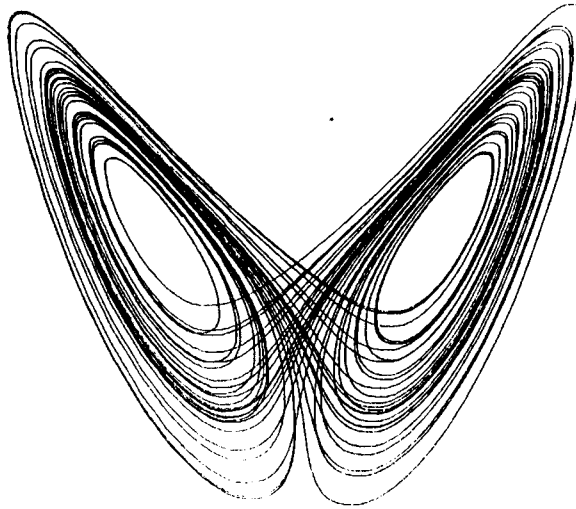


Bild 4:

*Die Simulation der Lorenz-Gleichungen liefert für weite Bereiche der Parameterwerte chaotische Bewegungen. Für die angegebenen Parameterwerte erhält man das wiedergegebene, flächenartige Gebilde, den sogenannten Lorenz-Attraktor. Jede Bahnkurve auf dem Attraktor überstreicht die deformierte Acht, wobei ein unregelmäßiger Wechsel vom rechten zum linken Teil der Figur beobachtet werden kann. Kleine Änderung des Ausgangszustandes führen zu völlig unterschiedlichem Verlauf der Bewegung. Jede Bahnkurve kommt jedem Punkt des Attraktors im Laufe der Zeit beliebig nahe, ohne sich zu schließen.*

gleichen dürfen. Zudem hätten sich solche winzigen, zu vernachlässigenden Differenzen zwischen Temperatur, Windstärke und Luftdruck in der Gesamtheit aufheben müssen. Der Sachverhalt, der in einer solchen Lehrmeinung zum Ausdruck kam, basiert auf dem Kausalitätsprinzip, das jedem physikalischen Modellsystem zugrunde lag. Die Ergebnisse von Lorenz widersprachen aber deutlich dieser Annahme.

Für die Meteorologie waren Lorenz' Ergebnisse geradezu irritierend, bedeuteten sie doch, daß langfristige Wettervorhersagen aus prinzipiellen Gründen nicht möglich sind, weil die Anfangsbedingungen nicht genau genug erfaßt werden können. Wie bei vielen anderen nichtlinearen Systemen, die scheinbar irreguläres Verhalten zeigen, hängen Wetter und Klima unter bestimmten Bedingungen sehr empfindlich von den Anfangsbedingungen ab. Minimale Abweichungen können bei kritischen Zuständen zu extremen Systemänderungen führen. Kleine Unterschiede werden schnell verstärkt und haben große qualitative Unterschiede im Endzustand zur Folge.

An einem einfachen Bild wird klar, wie der Begriff Abweichung zu verstehen ist und was Stabilität bedeutet, Bild 5. Wir wollen zwei Bahnen miteinander vergleichen, die jedoch von verschiedenen Landschaften umgeben sind: eine Talsohle und ein Bergkamm. Die exakte Anfangsposition A ist Ausgangspunkt der gewünschten Bahn; eine geringfügig

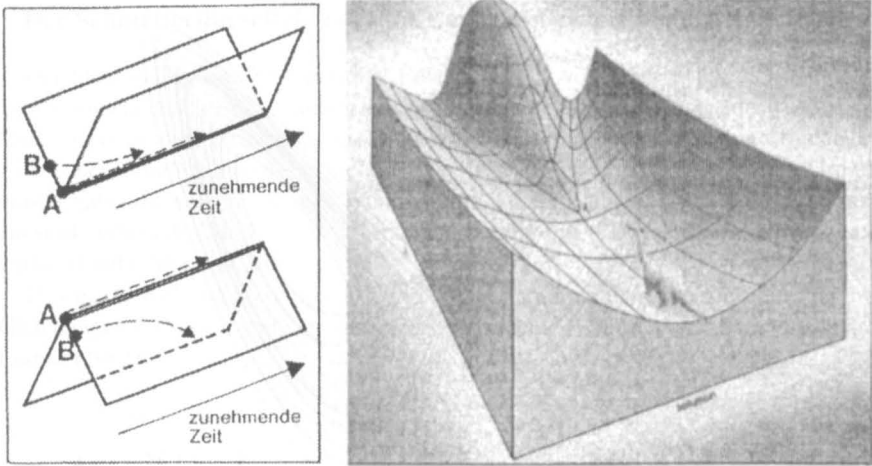


Bild 5:

*Idealisierte Talsohle und idealisierter Bergkamm und Ausschnitt aus einer „Landschaft“, nach Arcchi (1989) bzw. Nicolis (1991).*

gig verschobene Position B ergibt eine Bahn, die sich im ersten Fall der gewünschten Bahn allmählich nähert (die Zeit gleicht unseren Irrtum aus). Im zweiten Fall entfernt sich die Bahn aufgrund des Hauchs von Abweichung aber mehr und mehr von A (die fortschreitende Zeit verstärkt unseren Irrtum). Ein System, das an eine solche Charakteristik aufweist, ist für unregelmäßiges, chaotisches Verhalten anfällig. Ein solcher Bergkamm und eine solche Talsohle bilden auch für dynamische Systeme nur Teile größerer Landschaften.

Diese Empfindlichkeit der Dynamik gegenüber Störungen der Anfangsbedingungen bezeichnete Lorenz als Schmetterlingseffekt: Der Flügelschlag eines Schmetterlings in Braunschweig könne zwei Tage später das Wetter in München beeinflussen. Dies klingt zwar übertrieben, kennzeichnet aber sehr drastisch eine typische Eigenschaft nichtlinearer Systeme mit chaotischem Verhalten. Man nennt solche Systeme deshalb der Einfachheit halber chaotische Systeme.

## Kausalität

Aber was heißt es nun, ein chaotisches System sei sensitiv abhängig von den Anfangsbedingungen. Die Mathematik faßt diesen Sachverhalt in eine exakte Definition. Sie lautet sinngemäß: Starten wir die Rechnungen mit beliebig nahe beieinanderliegenden Anfangswerten, so entwickelt sich der Prozeß völlig unterschiedlich. Das bedeutet, eine sichere Prognose ist mit gerundeten Meßdaten nicht möglich, sondern nur mit exakten (schwache Kausalität). Die Genauigkeit eines Computers läßt sich sicher steigern,

aber es wird immer ein Meß- und Rundungsfehler bleiben, der den „Schmetterlingseffekt“ bewirken kann. Man kann also nie von einem geometrischen Punkt ausgehen, aus dem eine „Zukunftsline“ hervorgeht (wie Laplace glaubte), sondern in der Regel von einem kleinen Fleck oder Raum, von dem fächerförmig auseinanderlaufende Linien ausgehen.

Die Forschungsergebnisse von Lorenz blieben bis in die siebziger Jahre weitgehend unbeachtet. Dann setzten außergewöhnlich umfangreiche Aktivitäten ein, die sich mit dem Problem des scheinbar unregelmäßigen Verhaltens nichtlinearer dynamischer Systeme befaßten. Begünstigt durch die enorm gesteigerte Leistungsfähigkeit und die leichte Verfügbarkeit von Computern war es relativ einfach, nichtlineare dynamische Systeme zu simulieren und mit ihnen zu experimentieren. Charakteristisch an dieser neuen Sicht der Dinge ist, daß für die mangelnde Prognosefähigkeit nicht prinzipiell zu behebende Defizite des wissenschaftlichen Instrumentariums verantwortlich gemacht werden können, wie sie die Denkfigur des „Laplaceschen Dämons“ und die Annahme starker Kausalität physikalischer Systeme nahelegt, sondern die prinzipiell nicht vollständig darstellbaren Unregelmäßigkeiten des betrachteten Systems selbst. Ganz im Sinne des Laplaceschen Dämons ging man davon aus, es sei nur nötig, genügend viel Information anzusammeln und mit entsprechendem Aufwand zu verarbeiten.

Gleiche (schwache) Kausalität (Laplacesche Idee):

Gleiche Ursachen haben gleiche Wirkung.

Ähnliche (starke) Kausalität :

Ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkung,

(nötig wegen Experimenten).

Unregelmäßiges Verhalten nichtlinearer Systeme ist prinzipieller Natur und kann auch durch Anhäufen von mehr Information nicht vorhergesagt werden. Da dieses Zufallsverhalten in deterministischen Systemen auftritt, nennt man es auch deterministisches Chaos. Daß Systeme, die deterministischen Gesetzen folgen und keine zufälligen Anteile aufweisen, sich scheinbar regellos verhalten, klingt so paradox wie der Begriff deterministisches Chaos selbst. Der Begriff soll zum Ausdruck bringen, daß es dynamische Systeme gibt, die von deterministischen Gesetzen regiert werden und trotzdem unregelmäßiges Verhalten hervorbringen. Vorhersagen sind nur in den Phasen möglich, in denen sich das System „ordentlich“ verhält bzw. es sind jene Grenzen (mit Einschränkungen) vorhersagbar, in denen es sich chaotisch verhält.

Nichtlineare Systeme verhalten sich durchaus in weiten Bereichen „ordentlich“ – oder besser: regelmäßig – und weisen dort Gleichgewichtslagen oder Bewegungen auf, die langfristige Vorhersagen erlauben. Diese sind gekennzeichnet durch regelmäßige Attraktoren. Für bestimmte Parameterkonstellationen oder Anfangsbedingungen weisen sie jedoch scheinbar regelloses, chaotisches Verhalten auf. Man spricht dann auch von lokaler Instabilität, da sich benachbarte Zustände immer mehr voneinander entfernen, der Systemzustand aber trotzdem begrenzt bleibt. Die Bewegung verläuft dann auf sogenannten seltsamen Attraktoren.

## Was bleibt?

*Den Beifall aller hat erhalten,  
wer mit dem Angenehmen das  
Nützliche vermischt hat.*

Horaz

Würden Systeme, die chaotisches Verhalten zeigen, keinerlei Regelmäßigkeit aufweisen, so wären sie für die Forschung nicht interessant. Gerade der Übergang eines stabilen Systems in chaotisches Verhalten unterliegt einer Reihe bedeutender, universeller Gesetzmäßigkeiten. Außerdem sind wir heute in der Lage, den Grad der Unregelmäßigkeit zu quantifizieren. Damit können wir angeben, wie häufig wir messen müssen, um den Systemzustand mit einer gewissen Unschärfe beobachten zu können, Bild 6.

Einige wichtige geometrische Ideen, mit denen Eigenschaften seltsamer Attraktoren erklärt werden können, gehören ebenfalls in diesen Bereich. Viele haben sicher schon mal die ästhetischen Bilder gesehen, die sogenannte Fraktale wiedergeben. Von einer Gruppe

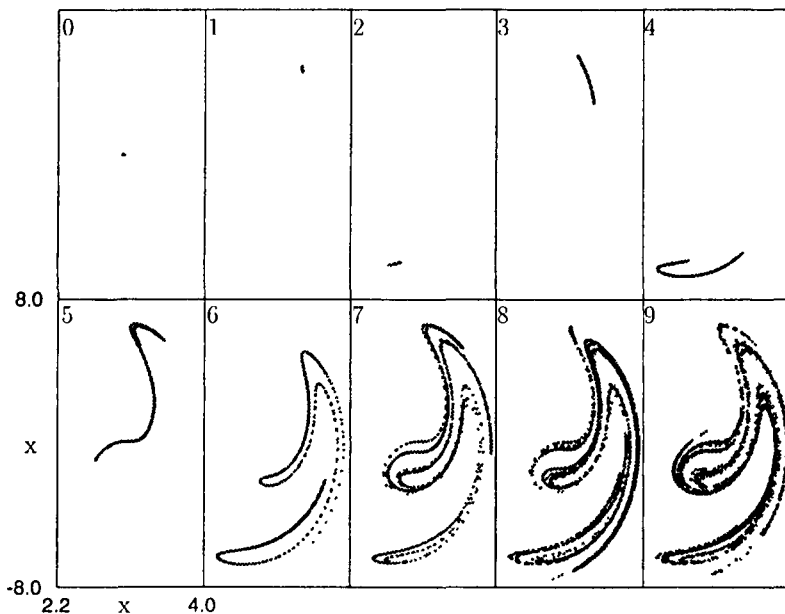


Bild 6:

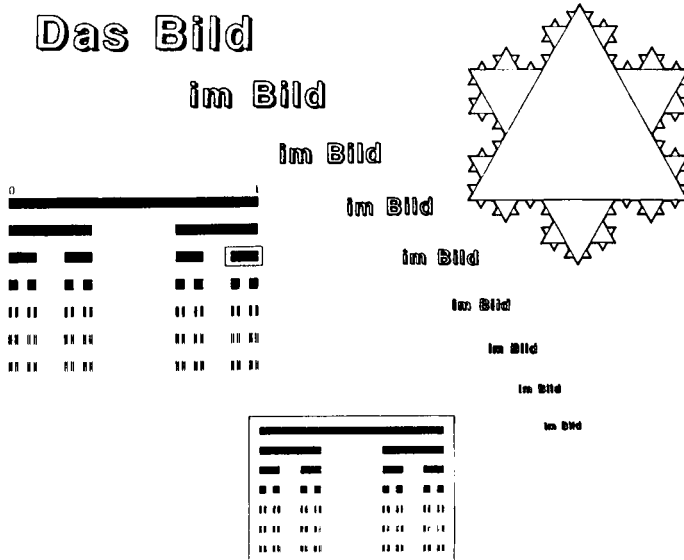
Während regelmäßigen Systembewegungen liefern wiederholte Messungen keine zusätzlichen Informationen. Die Information über den „Aufenthaltort“ des Systems auf dem Attraktor schwindet jedoch bei chaotischem Verhalten dahin. Die Bildfolge zeigt Schnittbilder durch den Duffing-Attraktor von Bild 3, die nach gleichen Zeitabschnitten beobachtet werden können. In der Umgebung eines Punktes wurden viele Startbedingungen gewählt. Nach kurzer Zeit bedecken die verschiedenen Lösungen den ganzen Querschnitt. Mit Hilfe der Kolmogorov-Sinai-Entropie und der Informationsdimension kann man abschätzen, wie zuverlässig Vorhersagen für einen gewissen Zeitraum bei gegebener Meßgenauigkeit sind oder wie häufig Messungen zu wiederholen sind.

um den Mathematiker Heinz-Otto Peitgen vom Bremer Institut für dynamische Systeme wurde die Herstellung dieser Computergraphiken zu einer meisterhaften Perfektion entwickelt. Eine Reihe von Büchern der Gruppe wurde zu Bestsellern, Peitgen und Richter (1986), Peitgen und Saupe (1988), Peitgen u. a. (1992). Eine einfache Figur, an der sich das Prinzip solcher Fraktale gut erklären läßt, ist die Koch-Kurve, Bild 7.

Sie stellt eine idealisierte Schneeflocke dar, die von einem unendlich langen Linienzug gebildet wird, aber nur eine endliche Fläche umrahmt. Auf den ersten Blick völlig anders, jedoch in der Gesetzmäßigkeit gleichartig ist die Situation mit der Cantormenge, Bild 7. Man entnimmt im Laufe der Zeit unendlich viele Elemente aus der Strecke von Null bis Eins. Zunächst das Mitteldrittel, dann von den verbleibenden Teilen das Mitteldrittel, dann von ... Die gesamte entnommene Strecke addiert sich zu Eins. Trotzdem bleiben unendlich viele Punkte zurück. Auf die gleiche Weise verhält es sich mit allen Gebilden, die in sich geschachtelte Bilder darstellen. Also eine unendliche Serie von Bildern: Das Bild, im Bild, im Bild, ...

Die fraktale Dimension erlaubt uns anzugeben, wie groß der Grad der Verschlungenheit, Verkrümpeltheit, Löcherigkeit einer unregelmäßigen Figur (Küstenlinie, Wolke, seltsamer Attraktor, ...) ist. Die Dimension von regelmäßigen Objekten ist uns intuitiv geläufig (Punkt, Linie, Fläche).

Die Dimension der Kochkurve ist größer eins aber kleiner als zwei, sie ist 1,2618; für die Cantormenge berechnen wir als Dimension den Wert 0,6309!



*Bild 7:*

*Die Koch-Kurve und die Cantor-Menge sind zwei Beispiele, die sehr anschaulich das Prinzip der fraktalen Geometrie wiedergeben.*

Die Aussagen dieses Abschnitts gehören zu den wichtigsten Erkenntnissen der Forschung auf dem Gebiet der nichtlinearen Dynamik und sind sicher mitverantwortlich für den Begriff „Chaostheorie“. Das enge Beisammensein von Ordnung und Unordnung, das nichtlineare Systeme auszeichnet, fasziniert. Chaostheorie, Chaomathematik und Chaosphysik sind aber eigentlich keine eigenständigen wissenschaftlichen Disziplinen, sondern eher reißerische Umschreibungen von Teilgebieten einer ernsthaften, aber auch komplexen Wissenschaftsrichtung, der Nichtlinearen Dynamik.

## Epilog

*Ach, wie bald schwindet  
Schönheit und Gestalt.*

Wilhelm Hauff

Die kurze Zeitspanne der jüngsten Wissenschaftsgeschichte, die mit der sogenannten „Chaosforschung“ verbunden ist, zeigt mehr als die hier diskutierten Ergebnisse. Sie macht deutlich, daß Werkzeuge, über die Wissenschaftler verfügen, die Theorien und Vorstellungen, die sie sich von der Welt entwickeln, mitprägen. Dies ist ein Sachverhalt, der viel zu wenig Beachtung findet. In der Regel wird es umgekehrt empfunden: die Theorien bzw. die Wissenschaften brächten die Werkzeuge oder die Technologien erst hervor.

Zunächst war das Thema Chaos vor allem für die Mathematik, Physik, Chemie, Populationsdynamik und in manchen Ingenieurdisziplinen von großem Interesse. Konnten dadurch doch viele Phänomene und oft als Schmutzeffekte eingestufte Unregelmäßigkeiten wenigstens zum Teil erklärt werden. Vor allem in den achtziger Jahren weckten attraktiv aufgemachte Publikationen und Ausstellungen von einer Reihe von Wissenschaftlern das Interesse einer breiten Öffentlichkeit an den manchmal als revolutionär bezeichneten Ergebnissen. Daß dann das Thema in vielfältiger Weise in vielen anderen, auch nichtwissenschaftlichen Bereichen aufgegriffen wurde, ist nicht verwunderlich.

Natürlich hat diese Publicity für eine an und für sich sehr trockene Materie aus Mathematik, Naturwissenschaften und Technik durchaus erfreuliche Elemente. Vor allem der Mathematikunterricht könnte damit wieder bilder-, experimentier- und anwendungsfreundlicher werden. Schüler und Studenten haben vielleicht wieder mehr Spaß an diesen Fächern. Aber die Popularität des Themas Chaos hat auch gezeigt, daß falsche Annahmen, mangelhafte Darstellungen, grobe Vereinfachungen und spekulative Schlußfolgerungen zu vielen Mißverständnissen führten und deshalb überzogene Erwartungen nicht erfüllt werden konnten. David Ruelle hat einmal gesagt: *Es ist mutig und vielleicht auch frech, Ergebnisse von physikalischen Experimenten und Modellen z.B. auf die Ökonomie oder Soziologie zu übertragen.*

Wir sind heute in der günstigen Lage, das Verhalten selbst komplexer Systeme mit Computer simulieren und uns fast spielerisch an ihre Eigenschaften gewöhnen zu können. Die klassischen Handwerkszeuge der Mathematik, nämlich Tafel, Kreide und Schwamm werden heute in der experimentellen Mathematik durch leistungsfähige Computer und hochauflösende Farbgrafik-Bildschirme ersetzt. Mit der Gewöhnung schärft



sich der Blick für allgemeine aber auch besondere Phänomene, Verständnis wächst auf beinahe empirische Weise.

Im Zuge solcher Bemühungen schaut sich ein Wissenschaftler gerne nach möglichst einfachen Systemen mit typischem Verhalten um. Es kann sehr hilfreich sein, mit dem mathematischen Pendel zu experimentieren. Schon an diesem simplen Beispiel lassen sich wesentliche Phänomene nichtlinearer dynamischer Systeme illustrieren. Aber ein Abbild komplexerer Systeme sind solche einfachen Modelle nicht.

Im Alltag haben wir es im allgemeinen mit untereinander verkoppelten Netzwerken zu tun, vor deren Komplexität wir häufig kapitulieren müssen. Ein Mediziner kann ein Lied davon singen. Das Verhalten großer, komplexer Systeme von Elementarteilchen kann sicher nicht durch einfache Extrapolation der Eigenschaften weniger Teilchen verstanden werden. Hingegen tauchen auf jeder Komplexitätsstufe neue Eigenschaften auf. Deshalb sollten wir uns hüten, voreilige Schlußfolgerungen für komplizierte Systeme aus einfachen Systemen abzuleiten.

„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ klingt wie eine Banalität, ist es aber nicht, wie man in der nichtlinearen Dynamik immer wieder erfährt.

Damit sind wir bei den Grenzen der Chaosforschung. Trotz einiger wichtiger Erkenntnisse muß man heute feststellen, daß die sogenannte Chaostheorie in vielen Disziplinen noch nicht die erhofften, oder man sollte vielleicht besser sagen, die propagierten Erfolge vorweisen kann.

Das menschliche Gehirn und das Nervensystem sind eben doch wesentlich verwickelter als viele physikalische Systeme. Die Elemente sozialer Systeme verfügen über einen eigenen Willen. Menschen können auf wirtschaftliche oder politische Prognosen kreativ reagieren und damit jede langfristige Vorhersagbarkeit zunichte machen. Es ist meiner Meinung nach prinzipiell nicht möglich, die schöpferischen Eigenschaften des Menschen in einem Modell auch nur annähernd zu erfassen.

Die Forschung auf diesem wichtigen und sehr anregenden Teilgebiet der nichtlinearen Dynamik ist noch zu jung, um aus ihr bereits eine umwälzende Wirkung abzuleiten. Aber sicher ist, daß das Thema Chaos viele ernsthafte Ergebnisse hervorgebracht hat und damit nicht nur eine Spielerei ist. Wir befinden uns heute in einer merkwürdigen Situation: In dem Maße, in dem unsere Möglichkeiten des Nachweises von chaotischen Bewegungen wachsen, wird es immer schwieriger, die Bedeutung des Chaos zu bewerten. Chaos ist aber weder Aberglaube noch Welterklärung.

Zweifellos werden Chaos und Fraktale einige dauerhafte Spuren hinterlassen, auch physikalische Erkenntnisse von bleibendem Wert. Die sogenannte Chaostheorie, deren gegenwärtiger Zustand von Peitgen einmal als „Sammelsurium von Ideen“ bezeichnet wurde, ist ein Teil der umfassenden Theorie dynamischer Systeme und wird es auch bleiben. Ähnlich verhielt es sich mit der ebenfalls viel Aufsehen erregenden Katastrophentheorie, sie ist Teil der Singularitätentheorie der Mathematik. Steffen (1994).

Lorenz' Entdeckung des Schmetterlingseffekts beruht darauf, daß im Zentrum seiner Untersuchungen nicht das wirkliche Wetter stand, sondern ein „Computerwetter“. Sein

Labor war keine Wetterstation, vielmehr waren Wirklichkeit und Labor im Computer zu einer Modellwelt verschmolzen, und es wurde eine Scheinwelt simuliert. Von Lorenz selbst wurde dies auch nicht anders dargestellt!

Damit komme ich auf die eingangs gestellte Frage zurück. Es mag nicht überraschen, daß die Antwort zwiespältig ist: Bei der Erforschung von Systemen, die sich scheinbar unregelmäßig, chaotisch verhalten, obwohl sie durch deterministische Gleichungen beschrieben werden, ist viel Nützliches entstanden. Viele modische Erscheinungen, die durch das Thema Chaostheorie aufgekommen sind, werden aber, wie das in der Mode so üblich ist, vergänglich sein.

*Danksagung:* Für die Hilfe bei der Vorbereitung der druckfertigen Bilder danke ich den Herrn Dipl.-Ing. Torsten Keller und Dipl.-Ing. Bodo Lagemann.

## Literatur

- Arecchi, T.: Chaos und Undeutlichkeit. LIBER (1989) Nr. 1, S. 16–17.  
 Argyris, J.; Faust, G.; Haase, M.: Die Erforschung des Chaos. Braunschweig/...: Vieweg 1994.  
 Bammé, A.; Kotzmann, E.: Der Schmetterlingseffekt. VDI nachrichten magazin (1989) Nr. 7, S. 38–40.  
 Brügge, P.: Kult um das Chaos – Aberglaube oder Welterklärung? DER SPIEGEL, Jg. 47 (1993) Nr. 39, S. 156–164; Nr. 40, S. 232–241; Nr. 41, S. 240–252.  
 Duffing, G.: Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz und ihre technische Bedeutung. Braunschweig: F. Vieweg, Heft 41/42, 1918.  
 Jackson, E.A.: Perspectives of nonlinear dynamics. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press 1989.  
 Kreuzer, E.; Kleczka, M.; Schaub, S.: Chaotic Dynamics of a Simple Oscillator – A Pictorial Introduction. Chaos, Solitons & Fractals 1 (1991) Nr. 5, S. 439–456.  
 Nicolis, C.: Le climat peut-il basculer. La Recherche 22 (1991) Nr. 232, S. 584–587.  
 Lorenz, E.N.: Deterministic Nonperiodic Flow. J. of Atmospheric Sci. 20 (1963) S. 130–141.  
 Peitgen, H.-O.; Jürgens, H.; Saupe, D.: Bausteine des Chaos – Faktale. Berlin/...: Springer-Verl. 1992.  
 Peitgen, H.-O.; Richter, P.H.: The Beauty of Fractals. Images and Complex Dynamical Systems. Berlin/...: Springer-Verl. 1986.  
 Peitgen, H.-O.; Saupe, D. (eds.): The Science of Fractal Images. New York/...: Springer-Verl. 1988.  
 Reti, L. (ed.): Leonardo – Künstler, Forscher, Magier. Frankfurt: Fischer Verl. 1974.  
 Richter, P.H.; Dullin, H.; Peitgen, H.-O.: Der SPIEGEL, das Chaos – und die Wahrheit. Phys. Bl. 50 (1994) Nr. 4, S. 355–358.  
 Steffen, K.: Chaos, Fraktale und das Bild der Mathematik in der Öffentlichkeit. DMV Mitteilungen 1 (1994) S. 25–40.  
 Straub, D.: Eine Geschichte des Glasperlenspiels. Irreversibilität in der Physik: Irritationen und Folgen. Basel/...: Birkhäuser 1990.

---

Prof. Dr.-Ing. E. Kreuzer  
 Arbeitsbereich Meerestechnik II der TU Hamburg-Harburg · Eißendorfer Straße 42  
 21071 Hamburg

# FESTVERSAMMLUNG IM ALTSTADTRATHAUS

## Ansprache und Bericht des Präsidenten

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. WERNER LEONHARD

Hohe Festversammlung, liebe Freunde der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, meine sehr verehrten Damen und Herren,

zu unserer heutigen Jahresversammlung möchte ich Sie alle herzlich begrüßen und Ihnen für Ihr Interesse danken, daß Sie sich die Zeit genommen haben, an unserer Jahresversammlung in diesem historischen Raum teilzunehmen. Unsere Gesellschaft leistet seit über 50 Jahren in unauffälliger Weise ihren Beitrag zum wissenschaftlichen Leben der Stadt, doch einmal im Jahr wendet sie sich an die interessierte Öffentlichkeit, um über die Arbeit des vergangenen Jahres zu berichten und einen neuen Träger der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille vorzustellen. **C. F. Gauß**, ein Sohn dieser Stadt, war einer der bedeutendsten Mathematiker der letzten Jahrhunderte. Seine Wirkungen reichen über die Gegenwart hinaus, wie jeder Student der Mathematik und der angewandten Naturwissenschaften schon in den ersten Semestern erkennt.

Mein besonderer Gruß gilt den Präsidenten und Vertretern wissenschaftlicher Akademien, Universitäten, wissenschaftlich-künstlerischer Institutionen sowie den Vertretern der Landes- und Bezirksregierung, unter deren besonderem Schutz wir stehen. Ich begrüße Abgeordnete des Bundestages und des Niedersächsischen Landtages. Der Stadtverwaltung, vertreten durch den Herrn Oberbürgermeister, danken wir für ihre Hilfe und die uns hier gewährte Gastfreundschaft. Unser Gruß gilt ferner den Repräsentanten der Gerichtsbarkeit und der Behörden sowie der Öffentlichkeit und der Medien, die Interesse an unserer Arbeit nehmen.

Begrüßen möchte ich alle unsere ordentlichen und korrespondierenden Mitglieder, vor allem auch die anwesenden früheren Träger der C. F. Gauß-Medaille; mein besonderer Gruß gilt **Herrn Prof. David G. Crighton, FRS**, von der Universität Cambridge, dem heute Auszuzeichnenden, sowie den Referenten des Akustik-Kolloquiums, das zu seinen Ehren heute vormittag in der neuen „Alten Waage“ stattgefunden hat.

Auch unseren Künstlern, die unsere Feier musikalisch umrahmen, danke ich sehr herzlich.

## Nachrufe

Im vergangenen Jahr hatte die BWG zahlreiche Todesfälle von Mitgliedern zu beklagen:

Am 28.6.94, kurz nach der letzten Jahresversammlung, starb im Alter von 70 Jahren Prof. Norbert **Kreutzkamp**, korrespondierendes Mitglied der BWG seit 1978. Er war bis zu seiner Emeritierung Direktor des Instituts für Pharmazeutische Chemie der Universität Hamburg. Seine Arbeiten über neue organische Phosphorverbindungen und biologisch aktive Wirkstoffe fanden weithin Anerkennung.

Am 19.8.94 verschied Theodor **Kaluza** im Alter von 83 Jahren, ordentliches Mitglied seit 1957. Als Professor für Mathematik an der Universität Hannover hat er wissenschaftliche Anerkennung mit der Untersuchung fast periodischer Funktionen mittels äquidistanter Zahlenmengen sowie mit Arbeiten aus der Kombinatorik und Graphentheorie gefunden. Zeitweilig war er auch Rektor seiner Universität.

Herr Otto **Rosenbach**, ordentliches Mitglied seit 1973, verstarb am 19.9.94 im Alter von 79 Jahren. Er war bis zu seiner Emeritierung Professor für Geophysik an der Technischen Universität Clausthal. Durch seine Arbeiten auf den Gebieten Gravimetrie, Seismik und Klinometrie hatte er weltweit Anerkennung gefunden. Er war Mitglied mehrerer Wissenschaftlicher Gesellschaften.

Im Alter von 93 Jahren verstarb am 11.10.94 Herr Martin **Grützmacher**, ordentliches Mitglied seit 1951. Er war bis zu seiner Pensionierung Leitender Direktor der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und Honorarprofessor für Akustik der TU Braunschweig. Seine Arbeiten über Akustik haben ihn in Fachkreisen weltweit bekannt gemacht, er wurde vielfach ausgezeichnet.

Am 28.10.94 verschied im Alter von 83 Jahren Herr Heinrich **Habekost**, ordentliches Mitglied unserer Gesellschaft seit 1969, seit 1985 korrespondierendes Mitglied. Bis zu seiner Emeritierung war er Direktor des Instituts für Stadtbauwesen an der TU Braunschweig. Veröffentlichungen über Abwassertechnik, Materialwanderung in Flüssen und Trümmerverwertung, nach dem Krieg ein wichtiges Thema, haben ihm wissenschaftliche Anerkennung gebracht.

Unser Kollege Edgar R. **Rosen** starb am 9.12.94 im Alter von 83 Jahren. Er war Mitglied seit 1975 und bis zu seiner Emeritierung Professor für Politikwissenschaft an der TU Braunschweig. Er war ein international tätiger Politikwissenschaftler mit historischem Blick; Schwerpunkt seiner Arbeiten, für die er viele Ehrungen erhielt, war die neuere Geschichte Italiens und der Schweiz.

Professor Hans **Goetting**, ordentliches Mitglied seit 1959, korrespondierendes Mitglied seit 1967, verstarb am 27.12.94 im Alter von 83 Jahren. Er war bis zu seiner Emeritierung Direktor des Diplomatischen Apparates und Direktor des Seminars für Mittlere und Neuere Geschichte der Universität Göttingen. Seine Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Urkundenlehre, Paläographie, Rechts- und Verfassungsgeschichte sowie Kir-

chengeschichte haben wissenschaftliche Resonanz gefunden. Er war Mitglied mehrerer Wissenschaftlicher Gesellschaften.

Im Alter von 72 Jahren starb am 16.1.95 Karl-Dietrich **Gundermann**, ordentliches Mitglied seit 1976. Er war bis zu seiner Emeritierung Professor für Organische Chemie an der Technischen Universität Clausthal und während zweier Amtsperioden deren Rektor. Seine Forschung widmete sich dem Gebiet der Chemolumineszenz organischer Verbindungen und der Bindung organischen Schwefels in Steinkohle. Er hat viel Anerkennung gefunden.

Schließlich starb vor wenigen Wochen, am 2.4.1995, Walter **Höpcke** im Alter von 86 Jahren, er war ordentliches Mitglied seit 1968. Bis zur Emeritierung war er Professor für Allgemeine Vermessungskunde an der Universität Hannover. Er hat sich vor allem mit Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Messung mit elektromagnetischen Wellen und der Korrelation geodätischer Daten einen wissenschaftlichen Namen gemacht.

Wir werden den Verstorbenen ein ehrendes Andenken bewahren.

### **Zuwahlen und personeller Stand der BWG**

Wir haben versucht, diese Verluste durch Zuwahlen auszugleichen. In zwei Wahlsitzungen wählte das Plenum auf Vorschlag der Klassen mehrere neue Mitglieder:

#### **Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften**

- Dr. rer.nat. Karl-Heinz **Glaßmeyer**,  
Univ.-Prof für Geophysik an der Technischen Universität Braunschweig
- Dr. rer.nat. Klaus **Görlitzer**,  
Univ.-Professor für Pharmazeutische Chemie an der Technischen Universität Braunschweig
- Dr. phil.nat. Joachim **Heidberg**,  
Univ.-Prof für Physikalische Chemie und Elektrochemie an der Universität Hannover  
sowie als korrespondierendes Mitglied
- Dr. rer.nat. Hans-Heinrich **Voigt**,  
Professor (em.) für Astronomie an der Universität Göttingen, ehem. Direktor der Sternwarte, Träger der Gauß-Medaille 1993

#### **Klasse für Ingenieurwissenschaften**

- Dr. rer.nat. Volkmar **Kose**,  
Vizepräsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt,  
Honorarprofessor für Präzisionsmeßtechnik an der Technischen Universität Braunschweig

- Dr.-Ing., Dr.-Ing. e.h. Hans-Peter **Wiendahl**,  
Univ.-Professor für Arbeitsmaschinen und Fabrikanlagen an der Universität Hannover
  - Dr.-Ing. Harald **Zenner**,  
Univ.-Professor für Hüttenmaschinen und Maschinelle Anlagen an der Technischen Universität Clausthal
- sowie als korrespondierendes Mitglied
- Dr.-Ing. habil. Günter **Zumpe**,  
Univ.-Professor für Technische Mechanik und Flächentragwerke an der Universität Dresden

#### **Klasse für Geisteswissenschaften**

- Dr. phil. Carsten-Peter **Warncke**,  
Univ. Professor für Kunstgeschichte an der Technischen Universität Braunschweig
- sowie als korrespondierendes Mitglied
- Dr. phil. Joachim **Poeschke**,  
Univ.-Professor für Kunstgeschichte an der Universität Münster.

Damit gehörten der BWG am 31.5.95 119 ordentliche Mitglieder an (davon 76 unter 70 Jahren), außerdem 70 korrespondierende Mitglieder.

#### **Wahl eines neuen Generalsekretärs und eines Klassenvorsitzenden**

Nach einer zweimaligen erfolgreichen Amtsperiode als Generalsekretär verabschiedete das Plenum der BWG am 16.12.94 Herrn Prof. Ulrich **Wannagat** mit herzlichem Dank für seine zeitraubende und uneigennützig aufgewendete Mühe und wählte Herrn Professor Helmut **Braß** für die Periode vom 1.1.95 bis 31.12.97 zum neuen Generalsekretär. Er hat sein Amt angetreten, und ich wünsche ihm Erfolg und eine glückliche Hand.

Der Turnus der Amtsperioden der Klassenvorsitzenden wurde neu geregelt, damit sie nicht zeitlich zusammenfallen.

Als Vorsitzender der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften für die Periode vom 1.1.95 bis 31.12.96 wurde in der Nachfolge von Herrn Professor Hans-Joachim **Kowalsky** am 14.10.94 Herr Professor Horst **Tietz** gewählt. Ich danke beiden Kollegen für ihre Bereitschaft, sich für die BWG zu engagieren.

## Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum erschienen

Das „Jahrbuch 1994“ der BWG und  
Die „Abhandlungen der BWG“, Band 45

### In den 8 Plenarsitzungen wurden folgende Vorträge gehalten:

- Probleme magnetischer Wechselfelder in Hochstromkreisen
- Aluminium-Druckguß
- Gorgonzola: Zeitgenössisches Bewußtsein und ursprüngliches Denken in einem Wortspiel Nietzsches
- Ariadne in der Antike und Neuzeit
- Molekulares Erkennen: 100 Jahre Schlüssel-Schloß-Hypothese durch Emil Fischer
- Ultrafilter in der Mathematik
- Braunschweig, die Stadt Heinrich des Löwen, im hohen Mittelalter nach archäologischen Quellen
- Das Gewächshausklima als Grundlage umweltschonender Pflanzenproduktion

### Außerdem wurden in den Klassensitzungen mehrere Vorträge gehalten

- Zahlen, Kreise, Kugeln
- Vorstellung einer Erstausgabe von „Apex phisice“
- Laser in der Medizin
- Neue Entwicklungen in der Meßtechnik
- Die Privatisierung öffentlicher Aufgaben als verwaltungstechnisches Problem

## Aus der Arbeit der Kommissionen

### *Bau- und Kunstgeschichte Niedersachsens*

Die Kommission hat sich nach der Unterbrechung der Arbeit wegen des Todes von Herrn Gosebruch unter dem Vorsitz von Herrn Professor Ullmann neu konstituiert. Der Band zum Goslar-Symposium 1989 ist inzwischen erschienen, der zum Halberstadt-Symposium wird in den Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften erscheinen. Die Arbeit der nächsten Monate ist durch die Veranstaltungen zum 800. Todesjahr Heinrich des Löwen in diesem Herbst geprägt, zu denen das Herzog Anton Ulrich Museum gemeinsam mit der BWG eine umfangreiche Vortragsreihe mit Ausstellung durchführt. Hierfür wird ein gemeinsam mit dem Museum herausgegebener Sammelband vorbereitet. Die Kommission wird sich auch an dem für 1996 geplanten Symposium „Königtum und Kirche als Kulturträger im Harzvorland – Quedlinburg, Gernrode“ beteiligen, das von der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig anlässlich ihres Gründungsjubiläums vorbereitet wird.

### *Recht und Technik*

Die Kommission hat im Berichtszeitraum die Planung eines Symposiums über Technische Regeln vorangetrieben. Dabei geht es um die Frage, wie Technische Regeln entstehen, wie sie von den Behörden angewendet und wie sie von der Rechtsprechung verarbeitet werden. Leider hat sich bisher kein Sponsor gefunden, doch haben wir angesichts der Bedeutung der zu untersuchenden Fragen die Hoffnung noch nicht aufgegeben.

### **Sonstiges**

Im übrigen ging das Leben in der BWG im vergangenen Jahr seinen gewohnt gemessenen Gang, manche würden ihn vielleicht eher gemächlich nennen. Immerhin gab es an einigen Stellen gefahrendrohende Klippen, die wir nur mit etwas Glück umschiffen konnten:

Da war einmal der **Haushalt**. Alle im Hochschul- und Wissenschaftsbereich Tätigen reden heute zwangsläufig vom Sparen, Abbau von Wildwuchs, Beschränkung auf das Notwendige, Mut zur Lücke und was es sonst an Euphemismen gibt. Wir haben das Glück, daß bei uns keine abzubauenen Stellen vorhanden sind, da wir nur über eine minimale Büropräsenz verfügen und sonst mit ehrenamtlichen Kräften arbeiten. Bei den Haushaltsmitteln (zwei Prozent des Haushaltes einer normalen Akademie, wie ich letztes Jahr schon sagte), bewegen wir uns am Rande dessen, was man bei Tarifverhandlungen wohl als „sozialen Sockelbetrag“ oder „Existenzminimum“ bezeichnen würde. Wir sind dem Land dankbar, daß es seine Hände über uns hält, auch wenn sie derzeit ziemlich leer sind, und damit unsere weitere Existenz sichert.

Dann war da noch die Schreckensbotschaft von der **gefährdeten baulichen Stabilität** der Felmy-Villa am Fallersleber-Tor-Wall, wo wir im Erdgeschoß als Mieter der Stadt eine ansehnliche Residenz haben. Die Frage war: Sanierung oder Abbruch? Hier hat die Stadt sich, trotz eigener gewiß nicht kleiner Finanzprobleme, zu einer großzügigen Lösung durchgerungen: Schonende Sanierung, sicher nicht ganz billig, eine Million wird sie schon kosten, aber als Beitrag zum Erhalt eines Restbestandes großbürgerlicher Häuser aus der Jahrhundertwende beispielhaft. Auch bei der Festlegung der Miete für die sanierten Räume hat der Sinn für Tradition über den heißen Atem des Investors gesiegt. So können wir zu wissenschaftsadäquaten Bedingungen weiter dort wohnen bleiben. Dies ist keine Selbstverständlichkeit und bedeutet finanzielle Opfer; wir sagen der Stadt Braunschweig, deren Namen wir tragen, unseren herzlichen Dank.

Nach diesem kurzen Bericht möchte ich zu dem wichtigsten Anlaß unserer heutigen Versammlung überleiten, der **Verleihung der Gauß-Medaille**.

Nachdem wir in den vergangenen Jahren auf Vorschlag der Klassen für Mathematik/Naturwissenschaften und für Geisteswissenschaften einen Astronomen und einen Historiker ausgezeichnet hatten, war es nun Aufgabe der Ingenieure, einen würdigen Vertreter der Technischen Wissenschaften zu finden.

Für die Wissenschaft gibt es bekanntlich keine Grenzen, 18 von bisher insgesamt 48 Preisträgern kamen aus dem Ausland (allenfalls legten die Möglichkeiten des Haus-



haltes der BWG wegen der Reisekosten eine Beschränkung auf das europäische Ausland nahe). Der schweifende Blick der Experten fiel bald auf einen eminenten Vertreter der angewandten mathematischen Physik, dessen Arbeitsgebiet mit technischer Akustik zu tun hat; freilich geht es hier weniger um Harmonien, als vielmehr um Geräusche oder besser gesagt um Lärm, und das eher an der Schmerzgrenze; so ähnlich wie das, was uns von Rasenmähern bekannt ist, nur viel schlimmer, nämlich um die von Flugzeugen, insbesondere Düsenantrieben abgestrahlten Schallwellen. Es ist schon erstaunlich, daß man auch solche Effekte mathematisch beschreiben kann; daß es wichtig ist, wird jeder einsehen.

Wir hatten heute morgen in der Alten Waage ein schönes und interessantes Kolloquium über damit zusammenhängende Fragen vor allem der mathematischen Modellierung solcher Vorgänge. Den im Programm genannten Referenten, die damit einen wichtigen Beitrag zur Gestaltung unserer Jahresversammlung geleistet haben, möchte ich herzlich danken.

Die Flugzeug-Gasturbine ist bekanntlich eine europäische, genauer eine britisch-deutsche Erfindung. Hier sind vor allen Frank Whittle in England und Hans von Ohain in Göttingen zu nennen, die in den dreißiger Jahren an dieser uns heute so vertrauten Weiterentwicklung von Propellerantrieben gearbeitet haben. Kurz vor dem Krieg startete bei Rostock das erste turbinengetriebene Versuchsflugzeug der Welt, und noch in den letzten Kriegsmonaten wurden bei uns an die tausend zweimotorige Düsenflugzeuge gebaut, ohne daß dies am Verlauf des Krieges irgend etwas geändert hätte. Nach dem Krieg riß wegen der Auflagen der Alliierten die Erfahrung auf diesem Gebiet ab, und erst seit einigen Jahrzehnten hat man bei uns in Forschung, Entwicklung und in der Industrie wieder Anschluß an den Stand dieser Technik gewonnen.

Der Gedanke lag also gar nicht so fern, einen britischen Wissenschaftler, der auf diesem Gebiet Hervorragendes geleistet hat, mit der Gauß-Medaille zu ehren und damit auch zu dokumentieren, daß es doch viel mehr Gemeinsames zwischen unseren Ländern gibt, als man manchmal beim Lesen der Zeitung vermuten sollte. Der heutige Preisträger, **Professor David G. Crighton, FRS**, steht in einer weiteren Tradition: einer seiner Vorgänger als Professor für Mathematik in Cambridge, **Sir James Lighthill**, wurde vor genau 20 Jahren, ebenfalls an dieser Stelle, mit der Gauß-Medaille ausgezeichnet. Manche werden sich noch an seinen schwungvollen Vortrag erinnern, in dem er den Vogelflug erklärte; wir können also gespannt sein.

Zunächst aber möchte ich unser Mitglied Herrn **Mahrenholtz** aus Hamburg bitten, den Preisträger vorzustellen und uns Laien seine wissenschaftlichen Leistungen zu erläutern.

---

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. W. Leonhard  
Am Schiefen Berg 32 · 38302 Wolfenbüttel



## Laudatio zur Verleihung der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille an Professor David G. Crighton

Von **Oskar Mahrenholtz**

David G. Crighton wurde im Jahre 1942 in Llandudno (gesprochen chan-did-no, mit ch wie in Küche), einer kleinen, auf der Landzunge zwischen der Conwy Bay und der Ormes Bay gelegenen Stadt an der Küste von Nordwales, geboren. Der Rundblick von Leandudno aus geht über die Irische See im Norden, die Insel Anglesey im Westen, über die Berge mit den berühmten Steinkreisen von Penmaenmawr (gesprochen penn-mein-maur) im Südwesten, über den Snowdon, den höchsten Berg von Wales, im Süden bis hin über das Meer in Richtung Liverpool im Osten. Die Wellen der Irischen See und die Brandung an der heimischen Küste begleiteten die früheste Kindheit des kleinen David, legten sie vielleicht in ihm einen Keim zu seiner später ergriffenen Lebensaufgabe, Wellen und durch Strömungen erzeugten Schall zu erforschen?

David Crighton siedelte bald nach London über und kam mit 11 Jahren in die Grammar School, die er 1961 verließ, um am St. John's College in Cambridge, U.K., später am Imperial College in London zu studieren. An letzterem promovierte er im Jahre 1969 im Alter von 27 Jahren im Fach Applied Mathematics. Es schlossen sich fünf Assistentenjahre am Imperial College an. Während dieser Zeit – Anfang der 70er Jahre – vermittelte ihm Dr. Heckl, jetzt Professor in Berlin, damals in München im Akustik-Beratungsbüro Müller BBM tätig, eine Einladung als wissenschaftlicher Mitarbeiter an dies Büro. Schon damals sprach David Crighton gut deutsch und konnte seine Deutschkenntnisse während der insgesamt etwa fünf Monate dauernden Arbeit in München weiter vervollkommen. Besonders willkommen war David Crighton der Aufenthalt in München auch deswegen, weil Bayreuth in erreichbarer Nähe liegt. Diese Stadt suchte er als Kenner und Liebhaber Wagnerscher Musik gerne auf, ja, er besuchte und besucht bis heute fast in jedem Jahr die Bayreuther Festspiele. So interessierte er sich auch von dieser Seite – und nicht nur in der Weltstadt München – für das deutsche Kulturleben und nimmt bis heute daran teil. So ist es nicht verwunderlich, daß er auch im außerwissenschaftlichen Bereich viele Deutsche zu seinen Freunden zählt.

Im Jahre 1974 wurde er auf den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik der Universität Leeds berufen, im Jahre 1986 folgte er einem Ruf auf den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik der Universität Cambridge, wo er seit 1991 Head of the Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics ist.

David Crighton erhielt zahlreiche Ehrungen, von denen hier nur seine Ernennung zum Fellow of the Royal Society genannt sei. Er ist Präsident der European Mechanics Society – EUROMECH –, er war Chairman verschiedener nationaler und internationaler Komitees auf dem Gebiet der nichtlinearen dynamischen Systeme und ist designierter Präsident des Institute of Mathematics and its Applications. Er arbeitet in mehreren Zeitschriften als Editor oder als Editorial Board Member mit, so z.B. als Editor der Pro-

ceedings of the Royal Society A und als Associate Editor des Journal of Fluid Mechanics, das wohl die renommierteste internationale Zeitschrift auf dem Gebiet der Strömungsmechanik ist.

David Crighton kommt hier zu uns nach Braunschweig aus dem Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics der Universität Cambridge. Aus dem Durchschnitt dieser beiden Bereiche – nämlich der angewandten Mathematik und der theoretischen Physik – stammen die mehr als 100 Veröffentlichungen, die von David Crighton seit 1969 vorgestellt worden sind. Viele dieser Arbeiten bieten Leckerbissen sowohl für Wissenschaftler mit vorwiegenden Interessen an der angewandten Mathematik als auch für solche, deren Interesse mehr in der theoretischen Strömungsphysik liegt. Eine angemessene Würdigung dieser Arbeiten ist in dieser kurzen Zeit ganz unmöglich, und so will ich nur auf einige wenige, mir besonders interessant und wichtig erscheinende Untersuchungen eingehen.

Im Mittelpunkt des bisherigen Lebenswerkes von David Crighton steht die Untersuchung der Ausbreitung von Wellen, und zwar die Ausbreitung von Wellen im Bereich der Mechanik. Sein Interesse erstreckte sich dabei von Problemen der Akustik – insbesondere auch solchen aus der *nichtlinearen* Akustik mit und ohne Berücksichtigung von Realglaseffekten – bis hin zu Fragen der Wellen in gasfluidized beds. Seine Untersuchungen gehören im allgemeinen zum Gebiet der *analytischen* Strömungsmechanik. Mir scheint, daß für die Durchführung der numerischen Rechnungen in seinen Veröffentlichungen ein PC ausgereicht hätte.

Unter den mathematischen Mitteln, die David Crighton zur Behandlung seiner Probleme einsetzt, ist in erster Linie die Störungsrechnung – einschließlich Asymptotik – zu nennen. Er handhabt diese Methode in all ihren klassischen und modernen Ausprägungen mit großer Meisterschaft, und es gibt kaum einen Aspekt der Störungsrechnung, aus dem David Crighton keinen Nutzen zur Lösung seiner Probleme gezogen hat. Mir scheint das Studium der Crightonschen Veröffentlichungen geradezu eine hervorragende Methode zu sein, um einen Eindruck von der heutigen Leistungsfähigkeit der Störungsrechnung in der Strömungsmechanik zu gewinnen. Dabei lernt man natürlich auch die anderen modernen Methoden zur analytischen Behandlung von Fragen der Wellenausbreitung kennen. Das reicht von der Fourier-Transformation – einschließlich Wiener-Hopf-Technik – für lineare Probleme bis zur Bäcklund-Transformation für nichtlineare Probleme. Die Gleichungen, mit denen sich David Crighton vorwiegend beschäftigt hat, liegen zwischen der Wellengleichung mit und ohne Konvektion und den nichtlinearen Modellgleichungen von Burgers (mit modernen Modifikationen) und Korteweg-de Vries sowie den neueren von Kadomtsev-Petviashvili und Zabolotskaya-Khokhlov. Seine Untersuchungen haben auch wesentlich mit dazu beigetragen, die physikalische Bedeutung dieser Modellgleichungen zu begreifen.

Es ist wohl kaum nötig zu erwähnen, daß die Themen der Crightonschen Arbeiten oft aus technischen Fragestellungen erwachsen. So sind die aeroakustischen Untersuchungen eng mit dem Problem des Fluglärms und auch mit Fragen der Unterwasser-Akustik verbunden. Seine ersten aeroakustischen Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Problem des Überschuß-Lärms (excess-noise). Dies ist ein Lärmanteil des Fluglärms,

der zusätzlich zum Mischungslärm des Strahles beobachtet wird. Er tritt hauptsächlich in Vorwärtsrichtung auf und ist wohl mit der Umströmung von Teilen im Triebwerk verbunden. Die von ihm durchgeführten Untersuchungen des Einflusses von Körpern, insbesondere von starren Platten, auf die Schallerzeugung und auf die Scherschicht-Instabilitäten scheinen deshalb naheliegend. Daraus ist dann in neuerer Zeit in Zusammenhang mit dem wachsenden Interesse an Turboprop-Flugzeugen sowie an Antrieben mit gleichsinnig und gegensinnig rotierenden Propellern eine Hinwendung von David Crighton zum alten Problem des Propellerlärms erwachsen. Die von ihm entwickelte Theorie der Schallerzeugung von Propellern mit vielen Blättern erwies sich dabei als erstaunlich leistungsfähig – schon bei zwei Blättern – und führte zum Verständnis einer ganzen Reihe von bis dahin nur aus numerischen Rechnungen erschlossenen akustischen Gesetzmäßigkeiten.

Ein anderer Weg führte ihn von der Schallerzeugung an Platten zur Untersuchung der Schwingungen elastischer Membranen und Platten mit und ohne Verstärkungsrippen unter dem Einfluß einer Belastung durch eine kompressible Flüssigkeit. Die Rippen isolieren dabei die einzelnen Segmente gegeneinander, und eine Wellenausbreitung geschieht unter Vermittlung der umgebenden Flüssigkeit. Auf diesem schwierigen Gebiet gelang es ihm, den Begriff der „großen“ (heavy) Belastung zu klären. Hiermit konnte er die Frage des Auftretens von Leitungs- Stoppbändern (pass- und stopbands) bei periodischer Anordnung der Rippen klären. Er zeigte auch, daß insbesondere im Fall der zusätzlich vorhandenen Strömung hier Phänomene auftreten, die ganz anders sind, als man es von der klassischen Wellengleichung gewohnt ist. So fand er hier Situationen, bei denen für die Untersuchung harmonisch erregter Schwingungen die alleinige Diskussion reeller Frequenzen oder doch nahezu reeller Frequenzen nicht ausreicht. Man muß vielmehr die Dispersionsgleichung in der ganzen komplexen oberen Halbebene studieren, um die richtige „Ausstrahlungsbedingung“ zu finden. Die Umgehung von Kausalitätsargumenten durch Rückgriff auf Ideen, wie sie mit Begriffen wie „Grenzabsorption“ (limit absorption) oder „Richtung der Gruppengeschwindigkeit“ verbunden sind, ist hier nicht möglich.

Die großen Schallamplituden, die in der Nähe der Flugzeugtriebwerke vorhanden sind, führten schon seit langem auf die Frage nach der Wichtigkeit der nichtlinearen Akustik. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß es auch von David Crighton wichtige Beiträge zu diesem Bereich gibt. Mit Störungsrechnung gelang ihm eine Diskussion der Lösungen der zylindrischen und sphärischen Burgersgleichung, die fast so weit führte wie die Diskussion der gewöhnlichen Burgersgleichung mit Hilfe der Hopf-Cole-Transformation. Mit seinem Beweis, daß die im Bereich der Solitonen so erfolgreiche Bäcklund-Transformation für parabolische Gleichungen nur bei der gewöhnlichen Burgersgleichung (und einer leichten Verallgemeinerung) anwendbar ist, dämpfte er wohl alle Hoffnungen auf eine Ausdehnung der Hopf-Cole-Transformation auf allgemeinere Fälle. Damit ist wohl die Erwartung, daß eine so weitgehende Diskussion der schwach nichtlinearen thermo-viskosen Schallwellen wie im ebenen Fall auch im zylindrischen und sphärischen Fall möglich ist, geschwunden.

Zum Abschluß möchte ich nicht versäumen, auf die Vielzahl von Übersichtsvorträgen hinzuweisen, die David Crighton in den letzten Jahren gehalten hat. Seine hervorragende

Kenntnis aktueller offener Probleme und seine Fähigkeit, diese Probleme seinen Zuhörern nahezubringen, hat schon intensives Interesse vieler Zuhörer an den dargestellten Fragen geweckt und sie zu neuen Untersuchungen angeregt.

In David Crighton ehren wir nicht nur den bedeutenden, erfolgreichen Wissenschaftler, sondern auch den lebenswürdigen, stets hilfsbereiten, sich im nationalen und internationalen Bereich mit ganzer Kraft für vertrauensvolle Zusammenarbeit einsetzenden Menschen.

Herzlichen Glückwunsch!

---

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Oskar Mahrenholtz  
TU Hamburg-Harburg · Arbeitsbereich Meerestechnik II  
Eißendorfer Str. 42 · 21073 Hamburg

Prof. Dr. Dr. h.c. Ernst August Müller, Göttingen,  
sei Dank für die Hilfe bei der Vorbereitung der Laudatio

## **Dankrede und wissenschaftlicher Vortrag des Gauß-Preisträgers 1995, David G. Crighton**

Distinguished President, Vice-President, Members of the Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft.

I regard it as a great honour to be recognized by your distinguished Society through the award of the 1995 Carl-Friedrich-Gauß-Medal. It is indeed an extraordinary privilege to have one's name associated in any way with that of Gauß, one of the deepest, broadest, most original and most powerful scientists of his and of any generation; and it implies a responsibility that I shall do my best to discharge in my future work, albeit at a level necessarily so far below that of Gauß. It is also an extraordinary privilege to be associated with the previous recipients of the Gauß Medal, among them many German scientists in the field of mechanics whose work I have read and admired for nearly 30 years, and among them also my greatly-esteemed fellow-countrymen Sir James Lighthill (1975) and Professor O.C. Zienkiewicz (1987).

I would like to use this opportunity to express my deepest gratitude to my Ph.D. supervisor and friend for more than 30 years, Professor J.E. Ffowcs Williams; to Sir James Lighthill for much help, instruction and inspiration throughout my career; to my parents; and to my dear wife Johanna for her unfailing support. My thanks are also due to Professor Mahrenholtz for his very kind words and actions on my behalf; to Dr. Roland Pitteroff for his help with the translation of my lecture; and above all to you, the President, Vice-President and Members of the Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft, for the recognition that you have today accorded me in the award of the 1995 Carl-Friedrich-Gauß-Medal.

Thank you!





DAVID G. CRIGHTON, Cambridge

## **Fortschritte auf dem Gebiet der Strömungsakustik**

Die theoretische Strömungsakustik, Aero- und Hydroakustik einschließend, wurde 1952 mit einer einzigen Veröffentlichung von Sir James Lighthill, dem Preisträger der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille im Jahre 1975, aus der Taufe gehoben. Diese Veröffentlichung, so bahnbrechend, daß sie keinen einzigen Literaturverweis enthält oder benötigt, bestimmte die Methoden der Strömungsakustik, und diese Methoden sind nach mehr als vierzig Jahren und einigen Tausenden von Veröffentlichungen weiterhin gültig. Es war mein großes Glück, vor fast dreißig Jahren als Doktorand von Professor J.E. Ffowes Williams in die Welt der theoretischen Aeroakustik eingeführt zu werden, in einer Zeit, die besonders fruchtbar für die Entwicklung der Strömungsakustik war, und die wichtige Anwendungen dieser Theorie sah. Seitdem hat das Tempo des Fortschritts in der Strömungsakustik merklich nachgelassen; der Triebwerkslärm von Düsenflugzeugen mit Unterschallgeschwindigkeit wurde zwischen 1960 und 1980 stark reduziert, und sogar die Concorde wurde „leise“ genug, um vor 20 Jahren im Einklang mit den damaligen Vorschriften in Dienst genommen werden zu können. Nach solchen Erfolgen ist die Entwicklung von Theorie und Technologie seither eher in kleinen Schritten als in bahnbrechenden Sprüngen vorangegangen. Wichtige Herausforderungen stellen sich jedoch auch jetzt: Wie gewinnen wir das notwendige Wissen, und wie läßt es sich in sichere und preiswerte Technologie übertragen, die geeignet ist, den abgestrahlten Schall von Propfan-Triebwerken, von Überschallflugzeugen der zweiten Generation oder von sehr großen Flugzeugen mit 800 oder mehr Fluggästen, unter Kontrolle zu bringen? Diese und andere Fragen, zusammen mit der allgemeinen Verschärfung der Schallschutzverordnungen, werden der Aeroakustik eine bedeutende Rolle in der Zukunft garantieren.

Um zu verstehen, warum die Lärmbekämpfung bei Flugmotoren so schwierig ist, muß man sich vergegenwärtigen, welchen Lautstärken- und Frequenzumfang das menschliche Ohr aufzunehmen fähig ist, und sich zudem das Verhältnis von abgestrahlter Schalleistung zu Triebwerksleistung vor Augen halten. Die Größenverhältnisse, die hier auftreten, findet man sonst nur in der Astro- oder Quantenphysik. So liegen zum Beispiel der Schalldruck, der der Hörschwelle entspricht (0 dB), und der Schalldruck, der der Schmerzschwelle entspricht (140 dB), 14 Zehnerpotenzen auseinander. Doch ein Schallpegel von 160 dB, der dauerhafte Hörschäden verursachen würde, entspricht Druckschwankungen von weniger als einem Millibar und daher einer vernachlässigbaren mechanischen Energie. Der Anteil der mechanischen Energie eines Strahltriebwerkes, der in Schall umgesetzt wird, ist sehr klein und kann folgendermaßen veranschaulicht werden: Die Lautstärke eines der älteren Düsenflugzeuge, einer Boeing 707 etwa, ist vergleichbar mit der Lautstärke, die 10 Milliarden Menschen, also die gesamte Weltbevölkerung, im Chor rufend hervorbringen. Heute sind diese älteren Flugzeuge durch neue ersetzt worden (z.B. Boeing 767, Airbus A310), die die doppelte Zahl an Passagieren über größere Entfernungen transportieren und Triebwerke mit der vierfachen Leistung verwenden. Die Lautstärke eines modernen Flugzeuges entspricht hinge-

gen der Lautstärke von nur 10 Millionen rufenden Menschen, also der Bevölkerung einer Metropole.

Die Annahme, daß die Lärminderung um 30 dB eine automatische Folge der verbesserten Aerodynamik des Flugzeuges und des höheren Wirkungsgrades der Triebwerke ist, wäre jedoch ganz falsch. Der akustische und der mechanische Wirkungsgrad haben fast nichts miteinander zu tun: Die gesamte während eines Flugzeugstarts abgestrahlte Schallenergie würde gerade ausreichen, um ein einziges Ei zu kochen! Die wissenschaftliche und technologische Herausforderung an die Strömungsakustik ist darin begründet, daß eine Lärminderung um einen Faktor Tausend verlangt wird, ohne daß Leistungseinbußen oder Gewichtserhöhungen in Kauf genommen werden dürfen.

Unter dem Schall leidet nicht eine Maschine oder ein Mikrophon, sondern der Mensch, dessen Gehörsinn im Bereich von 2 bis 4 kHz am empfindlichsten ist (und dabei diskrete Töne als am störendsten empfindet). Der überwiegende Teil der Energie des Flugzeugschalls hingegen liegt bei tieferen Frequenzen, typischerweise zwischen 200 und 400 Hz. Um den subjektiv empfundenen Lärm zu mindern, bedarf es Maßnahmen, die in einen Frequenzbereich eingreifen, der verhältnismäßig wenig Energie enthält. Die geeignete Maßnahme zu finden, ist die eigentliche Schwierigkeit. Man hat modifizierte Turbinenauslässe konstruiert, die zwar den Gesamtschallpegel mindern, dabei allerdings bedauerlicherweise den an sich schwachen aber gut hörbaren Schall erhöhen, so daß der gesetzlich vorgeschriebene Wert überschritten wird. Andere Maßnahmen reduzieren zwar den Schall in den für die Bewertung entscheidenden Frequenzen, führen aber zu Leistungsverlusten. Werden diese Leistungsverluste z. B. durch eine Erhöhung der Turbinenauslaßgeschwindigkeit kompensiert, so führt dies wiederum zu einem Anstieg des Schallpegels, unter Umständen bis auf ein Niveau, das über dem ursprünglichen liegt! Andere Neuerungen erhöhen das Gewicht des Flugzeugs über Gebühr oder bestehen zwar die Prüfung am Boden, versagen aber unter realistischen Flugbedingungen.

Zusammenfassend: Die Behandlung des strömungsakustischen Problems muß der Kostenseite Rechnung tragen und überdies die Subjektivität des Höreindrucks berücksichtigen. Es genügt nicht, ein isoliertes Triebwerk oder gar ein Modell in einem Versuchsstand zu analysieren. Es geht vielmehr um den Schall, wie er im Flugzeug oder außerhalb des Flugzeugs im routinemäßigen Einsatz wahrgenommen wird. Außerdem ist man sich seit einiger Zeit bewußt, daß im Landeanflug, bei dem die Triebwerke bei niedriger Last gefahren werden und man daher einen niedrigen Schallpegel erwarten würde, die Umströmung unentbehrlicher Teile des Flugzeuges wie z. B. Fahrgestell und Landeklappen, Schallpegel in der Größenordnung des Triebwerkslärms erzeugt.

Im Lichte dieser Vorbetrachtungen, welche Rolle kann mathematische Theorie einnehmen? Es ist klar, daß wir keine präzisen Vorhersagen von Absolutwerten erwarten können, es sei denn, es handelt sich um sehr einfache Strömungsvorgänge, weit einfacher als die turbulente Strömung eines Freistrahls bei realistischen Geschwindigkeiten. Selbst mit enormer Rechnerkapazität ist es unmöglich, die turbulente Strömung mit solcher Genauigkeit zu berechnen, daß man über diejenigen winzigen Details, die das Schallfeld bestimmen, Aussagen treffen kann. Solche Rechnungen durchführen zu können, ist die Hoffnung und das Bestreben einer neuen Disziplin innerhalb der Akustik, der

„numerischen Strömungsakustik“ („computational aeroacoustics“), die sich sowohl mit grundlegenden theoretischen Fragen auseinandersetzt als auch anwendungsorientierte Probleme zu lösen versucht. Bislang ist es nur gelungen, für sehr einfache instationäre Strömungen, die durch eine Wirbellinie oder zwei Ringwirbel erzeugt werden, gleichzeitig das Strömungsfeld und das Schallfeld zu berechnen, doch es ist sehr unwahrscheinlich, daß vollturbulente Fälle in hinreichend kurzer Zeit folgen werden.

Statt absoluter Vorhersagen muß man von der theoretischen Strömungsakustik die Aufklärung der schallerzeugenden Mechanismen, Ähnlichkeitsgesetze und Prinzipien, mit denen man experimentelle Ergebnisse auf einfache Gesetzmäßigkeiten zurückführen kann, verlangen. Weiterhin darf man Vorschläge für wegweisende Experimente und für Lärmbekämpfungsstrategien erwarten. Diesen Erwartungen wurde die Strömungsakustik bereits in ihren Anfängen gerecht: Lighthills Pionierarbeit, in der den exakten strömungsmechanischen Gleichungen die Form einer inhomogenen Wellengleichung aufgezungen wurde, erfaßte den Schall des turbulenten Freistrahls. Jede Abweichung von den Gesetzmäßigkeiten einfacher Ausbreitung von Schallwellen kleiner Amplitude in einem homogenen Medium erscheint als Quellterm, womit die Auswirkungen von turbulenten Strömungen, von Stößen und von Gradienten sowohl der mittleren Strömungsgeschwindigkeit als auch der Temperatur – wie viele andere Effekte im Lighthillschen strömungsakustischen Spannungstensor  $T_{ij}(\mathbf{x}, t)$  verborgen – abgedeckt werden.

Die Vorgehensweise in der theoretischen Strömungsakustik läuft nach dem folgenden Programm ab: Erstens, isoliere für den untersuchten schallerzeugenden Vorgang in der transparentesten Weise den relevanten Teil von  $T_{ij}$ ! Dazu mag es nötig sein, modellbildende Annahmen zu treffen und die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie unter Berücksichtigung des chemischen Gleichgewichts heranzuziehen. Zweitens, bestimme eine Greensche Funktion für die Wellengleichung und die jeweiligen Randbedingungen! (Zum Beispiel könnte der Verbrennungsvorgang in einem runden Kanal mit offenem Ende vonstatten gehen. Ebenso könnten die turbulenten Mischungsvorgänge in freier Atmosphäre oder nahe einer Oberfläche, z. B. einer Tragfläche, ablaufen.) Dieser Schritt ist mathematischer Natur und hat zu zahlreichen mathematischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Fourier-transformierten und der asymptotischen Methoden geführt. Drittens, berechne die Faltung der Quelle und der Greenschen Funktion, um die signifikanten Eigenschaften des Schallfeldes mit Hilfe der einfachsten aber hinreichend genauen Beschreibung der Quelle bloßzulegen, leite die Ähnlichkeitsgesetze ab, korreliere Vorhersagen mit den Ergebnissen aus Experiment und numerischer Simulation, und leite daraus Maßnahmen der Schallreduzierung ab!

Dieser dreistufigen Vorgehensweise folgten schon Lighthills ursprüngliche Veröffentlichung und die darauf aufbauenden Arbeiten. Entscheidend war der erste Schritt, in dem der Quadrupolcharakter der Quellen im turbulenten Freistrahle erkannt wurde. Somit war klar, daß diese Quellen – wie stets wenn die turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen klein sind gegenüber der Schallgeschwindigkeit – einen niedrigen akustischen Wirkungsgrad aufweisen.

Der zweite Schritt ist in diesem Fall trivial, der dritte Schritt hingegen alles andere als trivial. Trotz jahrzehntelanger Forschung auf dem Gebiet der turbulenten Strömungen

weiß man sehr wenig über den Lighthillschen strömungsakustischen Spannungstensor  $T_{ij}$ . Nicht eine seiner Komponenten ist bislang im Experiment gemessen worden. Da detaillierte Informationen über diesen Tensor auf Dauer fehlen werden, schloß Lighthill, daß man explizit den strengen Quadrupolcharakter der Quelle aufdecken muß.

Dies ist um so wichtiger, als Quelltypen höheren akustischen Wirkungsgrades, Monopole und Dipole, die der Erzeugung von Volumen und Impuls entsprechen, nicht vorkommen dürfen. Diese Überlegungen führten zum gefeierten und inzwischen allseits bekannten  $U^8$  Gesetz für die abgestrahlte Schalleistung  $P$ . ( $U$  ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Strahls.) Die Schalleistung ist proportional zum Produkt aus der Dichte, dem Quadrat des Strahldurchmessers und  $U^8$  geteilt durch die Schallgeschwindigkeit hoch fünf. Gemäß Theorie deckt dieses Gesetz den relevanten Geschwindigkeitsbereich, mit Ausnahme sehr hoher Geschwindigkeiten, ab. Aus dem  $U^8$  Gesetz folgt, daß nur ein sehr geringer Teil der Energie der Strömung in Schallenergie umgesetzt wird, und dies ist experimentell bestätigt worden.

Zum ersten Schritt der Lighthillschen Vorgehensweise, der Identifikation des schallerzeugenden Mechanismus, noch zwei Anmerkungen: Erstens triumphierte hier die Theorie über das Experiment. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung, 1952, und auch in den folgenden Jahren wurden experimentelle Arbeiten vorgestellt, deren Ergebnisse zu Ähnlichkeitsgesetzen mit niedrigeren Exponenten führten, Gesetze mit  $U^4$  bis  $U^6$ . Nach der Veröffentlichung von Lighthills  $U^8$ -Gesetz wurde rasch erkannt, daß in den experimentellen Studien nicht nur der von der turbulenten Strömung erzeugte Schall gemessen wurde sondern auch der Schall, der von der instationären Ausströmung aus der Turbine erzeugt wird. Diese zusätzliche Schallquelle hat Dipol- oder gar Monopolcharakter. Nachfolgende Experimente, in denen der am Turbinenauslaß hervorgerufene Schall eliminiert wurde, entsprachen dem  $U^8$  Gesetz mit erstaunlicher Genauigkeit.

Die zweite Anmerkung betrifft die Konsequenzen des Ähnlichkeitsgesetzes für die Praxis. Herkömmliche Triebwerke mit hoher Strömungsgeschwindigkeit  $U$  und kleinem Durchmesser  $D$  wurden durch Triebwerke mit kleinerer Strömungsgeschwindigkeit  $U$  und größerem Durchmesser  $D$  ersetzt. Verkleinert man z. B.  $U$  um einen Faktor zwei und erhöht  $D$  um einen Faktor zwei hoch drei Halbe, so bleibt die Triebwerksleistung unverändert, während die Schalleistung um einen Faktor  $2^5$ , gleichbedeutend mit 15 dB, sinkt. Überdies wirkt sich diese Maßnahme vorteilig auf das Schallspektrum aus, indem die lauteste Frequenz in den tieferen Teil des Spektrums verschoben wird und somit als weniger lästig empfunden wird. Auf den Gehörsinn und damit auf den nach den gesetzlichen Normen berechneten Schallpegel bezogen, übertrifft die Schallpegelminderung 15 dB bei weitem.

Eine ähnliche Vorgehensweise, zu deren Entwicklung ich selbst beigetragen habe, ist auf andere schallerzeugende Mechanismen angewandt worden. Erwähnt seien sowohl aeroakustische Schallquellen, die mit den Wechselwirkungen von Stößen und Turbulenz, mit dem Verbrennungsvorgang, und mit der Wechselwirkung des Triebwerkstrahls und Teilen der Flügel zusammenhängen, als auch hydroakustische Schallquellen. In der Hydroakustik ist es besonders wichtig, mittels geeigneter Modellbildung die korrekte Multipolstruktur der Quelle zu erkennen, da in Wasser die Machzahl, das Verhältnis von mittle-

rer Strömungsgeschwindigkeit und Schallgeschwindigkeit, typischerweise sehr klein ist,  $10^{-3}$  zum Beispiel. Eine scheinbar harmlose Vereinfachung in der Modellbildung kann ohne weiteres zu einer zusätzlichen Quelle mit zwar geringer Stärke aber hohem akustischen Wirkungsgrad führen, die die eigentlich vorgesehenen Quellen übertönt. Diese Anmerkung gilt besonders der „numerischen Strömungsakustik“, da numerische Verfahren zahlreiche Vereinfachungen erfordern. Die besonderen Schwierigkeiten, denen man in der theoretischen Strömungsakustik ausgesetzt ist, lassen sich folgendermaßen ausdrücken: „Fehler und Vereinfachungen müssen nicht nur klein sein, sondern unhörbar!“

Zuvor erwähnte ich die Wechselwirkung, im Landeanflug, von Turbulenz mit dem Fahrgestell und den Kanten der Flugzeugklappen. Die Schallfelder, die sich aus diesen Wechselwirkungen ergeben, weisen ungewöhnliche Eigenschaften auf, Eigenschaften, derer man zuerst mit theoretischen Methoden gewahr wurde, die man inzwischen aber auch in der industriellen Praxis in numerischen Ansätzen berücksichtigt. Die Wechselwirkung von turbulenter Strömung und der *hinteren* Kante der Tragfläche erzeugt ein Schallfeld, das am stärksten ist *vor* dem Flugzeug, und man muß damit rechnen, daß dieser Schallfeldtyp bei den noch größeren Flugzeugen der Zukunft an Bedeutung gewinnen wird.

Elegante experimentelle Untersuchungen dieser Wechselwirkungsphänomene durch Professor T. Kambe an der Tokioer Universität führten zur eindeutigen Bestätigung der Lighthillschen Theorie. Kambe führte sehr sorgfältig kontrollierte Experimente durch, in denen Ringwirbel miteinander, mit der Kante einer schmalen Platte, mit der Kante einer breiten Platte und mit einem Loch in einer Platte in Wechselwirkung gebracht wurden. Für solche idealisierte Fälle kann die Lighthillsche Wellengleichung vollständig gelöst werden. Kambe fand vollkommene Übereinstimmung von Theorie und Experiment. In jüngster Zeit sind in der direkten numerischen Simulation solcher einfachen aber dennoch technisch relevanten Wechselwirkungsphänomene ebenfalls große Fortschritte erzielt worden.

Die Strömungsakustik ist reich an interessanten Effekten mit großer Wirkung und kleiner Ursache. Vielleicht darf ich hier kurz auf einen Teil meiner Doktorarbeit eingehen, auf die Wirkung von Gasblasen in einer turbulenten Flüssigkeit (z. B. im Nachlauf eines Schiffes oder in den Grenzschichten am Rumpf) auf den Schall gemessen in der blasenfreien Umgebung. Entscheidend ist die Kompressibilität des Zwei-Phasengemisches (Luft, Wasser) ausgedrückt in der Schallgeschwindigkeit. Für sehr niedrige Konzentrationen an Blasen, ein Promill etwa, ist die Schallgeschwindigkeit rund 100 Meter pro Sekunde und damit nur ein Zehntel der Schallgeschwindigkeit in blasenfreiem Wasser (und auch nur ein Drittel der Schallgeschwindigkeit in Luft). Dieser erstaunlich große Unterschied hat bedeutende Auswirkungen auf den von der Turbulenz hervorgebrachten Schall. Es gelang mir zu zeigen, daß die von der Turbulenz ausgehende Schalleistung in der blasenbehafteten Strömung den Wert für die blasenfreie Strömung bei weitem übertrifft, und zwar schätzungsweise um das Hunderttausendfache bei einer Blasenkonzentration von einem Promill.

An dieser Stelle möchte ich gerne eine Entwicklung in der Strömungsakustik erwähnen, die mich in den letzten zehn Jahren stets interessiert hat. Es handelt sich um die

mögliche Einführung von „Propfans“, moderne Hochgeschwindigkeitspropeller, im Luftverkehr. Bedeutende Treibstoffeinsparungen, von 20 bis 50 %, werden prognostiziert, besonders wenn zwei dicht benachbarte, gegenläufige Propfans verwendet werden. Allerdings ist es bislang nicht klar, ob die Schallpegel auf die im nächsten Jahrtausend zu erwartenden gesetzlichen Grenzwerte abgesenkt werden können. Die Berechnung des Schallfeldes für zwei gegenläufige Propeller bei großem Schub ist gespickt mit Schwierigkeiten. Das Spektrum weist zum einen zahlreiche tonale Maxima auf, deren Amplituden von einer Vielzahl von geometrischen und aerodynamischen Parametern abhängen, und zum anderen Breitbandgeräusch, das mit stochastisch verteilten Schwankungen in der Zuströmung zusammenhängt.

Die Berechnung der Amplitude und der Richtcharakteristik für einen jeden dieser zahllosen Töne als Funktion aller Parameter ist kaum möglich. Ich selbst bin dieses Problem systematisch mit Hilfe asymptotischer Verfahren angegangen, unter der Annahme, daß die Zahl von Propellerblättern recht groß ist. Im Fall der getesteten Prototypen liegt diese Zahl bei 8 bis 16, hinreichend groß für das Rechenverfahren. Die theoretische Behandlung benötigt nur genaue Angaben über die Geometrie des einzelnen Propellerblattes (das gebogen, verdreht und geschrägt ist) und die stationäre Druckverteilung auf der Propellerblattoberfläche. Die Verteilung der starken, instationären Schallquellen hervorgerufen durch die Wirkung der beiden Propeller aufeinander wird ebenfalls unter der Annahme einer großen Propellerblattzahl analytisch berechnet, also ohne Computer. Schließlich wird unter derselben Annahme, und noch immer ohne Computer, das Schallfeld bestimmt.

Das Ergebnis ist eine Formel für die Intensität und die Richtcharakteristik für die Hunderte von Tönen im hörbaren Frequenzbereich in Abhängigkeit aller Parameter. Für gegebene Werte der Parameter können die Amplituden aller Töne mit geringem Aufwand berechnet werden (mit einem Taschenrechner). Überdies erlaubt das Verfahren, Information über den für jeden Ton verantwortlichen Wechselwirkungsmechanismus zu extrahieren (also die Quelle jedes Tones zu identifizieren), womit man dann abschätzen kann, ob Maßnahmen zu seiner Eindämmung getroffen werden können. Überraschend gute Übereinstimmung von Theorie und Experiment wurde für ein Flugzeug des Typs Fairey Gannet erzielt. In der Folge wurde ein Patent für den optimalen Schrägwinkel des Propellerblattes erteilt. Seit Jahren ist diese Theorie, als Computer-Programm implementiert, bei Rolls-Royce im täglichen Einsatz, was wiederum zu steter Erweiterung und Verfeinerung der Theorie geführt hat. Dies stellt für mich das befriedigendste und erfolgreichste Stück angewandter Mathematik dar, an dem ich bislang beteiligt war.

Zusammenfassend, sehr geehrter Herr Präsident, möchte ich sagen, daß ich weiterhin die Strömungsakustik für das ideale Anwendungsgebiet für die angewandte Mathematik britischen Stils halte. In der Strömungsakustik benötigt man die Fähigkeit zur konstruktiven Modellbildung, physikalischen Spürsinn und eine reiche Palette von analytischen Methoden, um zu tiefergehendem Verständnis zu gelangen, um die wichtigen Prinzipien zu erkennen, und um Nutzen aus experimentellen Ergebnissen zu ziehen. Die Aufgabenstellungen in der Strömungsakustik berühren die Grundfragen der Mechanik, sie sind komplex und subtil zugleich. Die vollständige numerische Berechnung realistischer Fäl-

le liegt weiterhin in der Ferne. Und experimentelle Methoden sind häufig den gleichen Schwierigkeiten ausgesetzt wie numerische Methoden. Analytische Methoden sind, meiner Meinung nach, daher weiterhin unersetzlich.

Trotz des enormen Fortschritts, den wir in den 43 Jahren seit Lighthills Grundsteinlegung sowohl in der Wissenschaft als auch in der Technik gesehen haben, verbleiben zahlreiche herausfordernde Aufgaben, in deren Lösung die angewandte Mathematik weiterhin eine Schlüsselrolle einnehmen wird.

# DIE BRAUNSCHWEIGISCHE WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT

VERLEIHT DIE  
CARL-FRIEDRICH-GAUSS-MEDAILLE

HERRN PROFESSOR  
**DAVID G. CRIGHTON**, FRS

UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

IN WÜRDIGUNG SEINER AUSSERORDENTLICHEN  
VERDIENSTE BEI DER ERFORSCHUNG  
AKUSTISCHER PHÄNOMENE UNTER EINSATZ  
MODERNER MATHEMATISCHER METHODEN

Professor Dr. Crighton hat mit seinen Arbeiten zur Aero- und Hydroakustik im Hinblick auf die Geräuscherzeugung bei instationären und turbulenten Strömungen, in der Strukturakustik, der Propellerakustik und der nichtlinearen Akustik Richtungsweisendes geleistet. Seine virtuose Handhabung mathematischer Methoden ist beispielgebend. Sein Einsatz für internationale fachliche Zusammenarbeit setzt Maßstäbe.

Braunschweig, den 30. April 1995



Präsident  
der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft



**Crighton**, David G. Ph.D., FRS, Head of Department of Applied Mathematics & Theoretical Physics, University of Cambridge.

- Geboren:** 15. November 1942, Llandudno, Wales, United Kingdom
- Ausbildung:** Watford Grammar School, 1953–1961  
 St. John's College, Cambridge, 1961–1964;  
 BA (First Class Honours) 1964;  
 Imperial College, London, 1967–1969;  
 Ph. D. (Applied Mathematics) 1969  
 University of Cambridge; Sc.D. 1993
- Positionen:** Lecturer, Woolwich Polytechnic, London, 1964–1966  
 Research Assistant, Imperial College, London, 1967–1974  
 Professor of Applied Mathematics, University of Leeds, 1974–1985  
 Professor of Applied Mathematics, University of Cambridge,  
 seit 1986  
 Fellow of St. John's College, Cambridge, seit 1986  
 Head of Department of Applied Mathematics & Theoretical Physics  
 seit 1991
- Ehrungen:** Fellow of the Royal Society, seit 1993  
 American Institute of Aeronautics & Astronautics  
 Aeroacoustics Medal & Award, 1986  
 Rayleigh Medal, Institute of Acoustics, 1988  
 Per Bruel Gold Medal, American Society of Mechanical Engineers,  
 1993
- Ämter in  
Wissenschafts-  
organisationen:** President, EUROMECH – European Mechanics Society, seit 1993  
 Chairman, European Mechanics Council, 1988–1992 (member:  
 1984–1992)  
 Chairman, SERC Nonlinear Systems Initiative, 1988–1992  
 Chairman, SERC Mathematics Committee, 1991–1994  
 (Member: 1986–1991)  
 Chairman, NATO Nonlinear Science Panel (Chaos, Order and  
 Patterns), 1989–1993  
 President-elect, Institute of Mathematics and Its Applications,  
 seit 1996
- Herausgeber-  
tätigkeit:** Editor, Proceedings of the Royal Society, A, seit 1994  
 Associate Editor, Journal of Fluid Mechanics, seit 1979  
 Editor, Cambridge Texts in Applied Mathematics, seit 1986  
 Editorial Board Member: Journal of Sounds and Vibration, Wave  
 Motion, Applied Mathematics Letters, European Journal of Applied  
 Mathematics, Journal of Computational Acoustics, CHAOS – AIP  
 Nonlinear Science Journal
- Publikationen:** Mehr als 100 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften



## Schlußworte des Generalsekretärs

Meine sehr verehrten Damen und Herren!

Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft dient der Wissenschaft. So steht es in § 1 unserer Satzung, und damit ist der Maßstab vorgegeben, den wir bei einer Rückschau auf unsere heutige Veranstaltung anzulegen haben.

Man dient der Wissenschaft gewiß nicht nur durch Erweiterung unserer Kenntnisse, vielmehr ist es eine nicht minder wichtige Aufgabe, in der Öffentlichkeit für Wissenschaft zu werben. Öffentlichkeit: das meint auch den Wissenschaftler im Nachbarfach, denn wie soll ertragreiche Interdisziplinarität anders entstehen, als über das geweckte Interesse am anderen Fach.

Verständnis für die Sache der Wissenschaft zu erreichen, scheint um so notwendiger zu sein, als im politischen Raum immer deutlicher ausgesprochen wird, daß vor allem diejenige Wissenschaft förderungswürdig ist, die unmittelbar der Wirtschaft zuarbeitet. Hier muß – im wohlverstandenen Gemeininteresse – deutlich widersprochen werden. Wissenschaft bedarf der Freiheit, auch der Freiheit, sich Ziele zu setzen, deren Beitrag zur Erhöhung des Bruttosozialproduktes nicht erkennbar ist.

Unsere Veranstaltung heute war der technischen Mechanik gewidmet, deren wissenschaftliche Bedeutung jedermann vor Augen liegt. Aber die großartige Entwicklung dieses Gebietes, von der die Vorträge Zeugnis ablegen, wäre nie möglich gewesen, wenn man sich nicht hätte eines Reservoirs von Werkzeugen bedienen können, das von Mathematikern konstruiert wurde, die weit entfernt von jeglicher Anwendungsorientierung arbeiteten. Ich nenne als Beispiel nur die Matrizenrechnung, die im vorigen Jahrhundert konzipiert wurde, aber erst in den letzten vierzig Jahren in den Ingenieurwissenschaften zu großer Bedeutung gekommen ist. Und ein zweites: Es ist – auch in technischen Disziplinen – sehr kurzsichtig, die Bedeutung einer Theorie nach ihren unmittelbaren Umsetzungsmöglichkeiten zu beurteilen. Ich erinnere an Euler, der die fundamentalen Grundgleichungen der Hydrodynamik aufgestellt hat, aber gleichwohl beim Bau einer Fontäne in Sanssouci einen vollständigen Fehlschlag erlitt.

Nun, heute können wir Fontänen bauen – nehmen wir sie als Symbol für das, was Wissenschaft auch sein muß: eine Leistung einiger, an der wir alle uns erfreuen können; obwohl nicht der Wirtschaft nützend, nicht energiesparend, nicht ressourcenschonend – eine Sache, die wir nicht missen wollen: ein Stück Kultur.

Lassen Sie mich zum Schluß namens der BWG noch einige Worte des Dankes sagen.

Unser ganz besonderer Dank gilt dem diesjährigen Gauß-Medaillenträger, Ihnen, Herr Professor Crighton, der Sie uns in Ihrem gehaltvollen und verständlichen Vortrag aus Ihrem hochaktuellen Forschungsgebiet berichteten. „Bekanntermaßen hängt die Leistungsfähigkeit der Forschung vor allem von Engagement und von der Überzeugungskraft wissenschaftlicher Spitzenkräfte ab“, so im Bericht der Forschungskommission Niedersachsen 1994. Daß Herr Professor Crighton eine solche Spitzenkraft ist, die sich würdig in die Reihe der Gauß-Medaillen-Träger einordnet, hat uns Herr Professor Mahrenholtz in eindrucksvoller Weise dargetan, dafür gebührt ihm unser Dank.

Wenn – wie ich glaube – unsere Vormittagsveranstaltung zu einer Werbung für Wissenschaft geworden ist, so haben wir das den Herren Professoren Steck, Oertel und Kreuzer zu danken, die die nicht geringe Mühe derartiger wissenschaftlich anspruchsvoller, aber gleichwohl nicht hochspezialisierter Vorträge auf sich genommen haben.

Nicht zuletzt danken wir der Stadt Braunschweig, deren Gastfreundschaft uns wiederum erlaubt hat, die feierliche Jahresversammlung an diesem traditionsreichen Ort abzuhalten. Zum Schluß gilt mein Dank den Musikern vom Staatsorchester Braunschweig, die nun unsere Feier musikalisch ausklingen lassen.

Helmut Braß

# MITTEILUNGEN

## Veröffentlichungen

Im Berichtsjahr wurden veröffentlicht:

„Jahrbuch 1994 der BWG“ mit 205 Seiten,

„Abhandlungen der BWG“ Band XLV, 1994 mit 264 Seiten

## Geschäftliche Mitteilungen

Am 31.12.1995 gehörten der BWG 117 ordentliche Mitglieder, davon 75 unter 70 Jahren, sowie 68 korrespondierende Mitglieder an. Die Zahl der Mitglieder unter 70 Jahren betrug in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften 22, in der Klasse für Ingenieurwissenschaften 37 und in der Klasse für Geisteswissenschaften 16. Von den ordentlichen Mitgliedern zählten zum Bereich Braunschweig 64, zum Bereich Clausthal 12, zum Bereich Göttingen 8 und zum Bereich Hannover 33.

Am 08.12.1995 wurde Prof. Dr. phil. Norbert Kamp zum neuen Präsidenten der BWG für die Zeit vom 01.01.1996 bis 31.12.1998 gewählt.

Die BWG war bei den Feierlichen Jahresversammlungen der acht deutschen Akademien der Wissenschaften (Berlin, Dresden, Düsseldorf, Erfurt, Göttingen, Heidelberg, Mainz und München) durch ihren Präsidenten bzw. Abgesandte vertreten. Darüber hinaus war die BWG zu einer großen Zahl von Veranstaltungen des Landes Niedersachsen, der Stadt Braunschweig und einiger Gesellschaften und Hochschulen eingeladen.

Das Plenum trat am 08.12.1995 zu seiner jährlichen Hauptsitzung zusammen, nahm die Jahresberichte des Präsidenten und Generalsekretärs entgegen und beschloß den Haushaltsentwurf 1996. In Wahlsitzungen am 07.04.1995 wurden die auf Seiten 198–201 vorgestellten Mitglieder hinzugewählt.

Das am 08.12.1995 tagende Konzil wählte den Gauß-Preisträger 1996 und legte die Feierliche Jahresversammlung auf den 14.06.1996 fest.



# PERSONALIA

## Todesfälle

Es verstarben im Berichtsjahr:

- 16.01.1995 Karl-Dietrich Gundermann, Dr. rer. nat., Prof. em. für Organische Chemie an der TU Clausthal. Ordentliches Mitglied seit 1976 in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften
- 02.04.1995 Walter Höpcke, Dr.-Ing., Prof. em. für Allgemeine Vermessungskunde an der Universität Hannover. Ordentliches Mitglied seit 1968 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften
- 14.08.1995 Helmut Beumann, Dr. phil. Dr. h.c., Prof. em. für Mittelalterliche Geschichte, Verfassungs- und Ideengeschichte, eh. Direktor des Historischen Instituts der Universität Marburg. Korrespondierendes Mitglied seit 1985 in der Klasse für Geisteswissenschaften
- 23.09.1995 Albrecht Unsöld, Dr. phil. Dr. rer. nat. h.c., mult., Prof. em. für Theoretische Physik an der Universität Kiel. Korrespondierendes Mitglied seit 1946 in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften
- 06.10.1995 Hermann Blenk, Dr. phil., Prof. em. für Angewandte Mechanik an der Technischen Universität Braunschweig. Ordentliches Mitglied seit 1944 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften
- 26.10.1995 Wilhelm Wortmann, Dipl.-Ing. Dr.-Ing. E.h., Prof. em. für Stadt- und Regionalplanung an der Universität Hannover. Ordentliches Mitglied seit 1958 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften
- 16. 11.1995 Klaus Pieper, Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h., Prof. em. für Statik an der Technischen Universität Braunschweig. Ordentliches Mitglied seit 1971 in der Klasse für Bau-/Ingenieurwissenschaften, seit 1985 korrespondierendes Mitglied
- 28.12.1995 Walther Killy, Dr. phil., Prof. em. für Deutsche Literaturwissenschaft, Herzog-August-Bibliothek, Wolfenbüttel. Ordentliches Mitglied seit 1979 in der Klasse für Geisteswissenschaften

# NACHRUFE

## MARTIN GRÜTZMACHER

\* 10.11.1901 † 11.10.1994

Martin Grützmacher wurde am 10. November 1901 in Heidelberg geboren; dort begann er auch mit seiner Schulbildung, deren humanistische Grundlagen – neben Latein und Griechisch lernte er auch die Welt des Hebräischen kennen – seine spätere Persönlichkeit entscheidend geprägt haben. Sein weiterer Lebensweg führte ihn mit einer kürzeren Episode an der Technischen Hochschule in Danzig nach Münster, wo er sein Studium der Physik bereits 1924 mit der Promotion zum Dr. phil. abschließen konnte. War das Thema seiner Doktorarbeit noch den dielektrischen Eigenschaften von Flüssigkeiten gewidmet, so wandte er sich anschließend der Akustik zu. Auf diesem Gebiet hat er in der Folgezeit durch eine Reihe von grundlegenden Arbeiten internationale wissenschaftliche Reputation erworben.

Als Mitarbeiter des Telegraphentechnischen Reichsamtes berichtete er auf der Physikertagung 1927 über eine neue Methode der Klanganalyse. Dieses sogenannte Suchtonverfahren hat über mehrere Jahrzehnte die Analysetechnik in der Akustik bestimmt. Im Jahre 1930 übernahm er die Leitung des akustischen Laboratoriums im Reichspost-Zentralamt, 1934 wurde er schließlich Mitglied der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt und übernahm die Leitung des Laboratoriums für Akustik. Dies war die Keimzelle für bedeutende Arbeiten, aus denen schließlich später in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt die Abteilung „Akustik“ entstand. Auch heute noch bilden die akustischen Fachgruppen der PTB eine Konzentration von wissenschaftlicher Kompetenz auf einem wichtigen und eigenständigen Gebiet, für die sich weltweit kaum Vergleichbares findet.

Während des Krieges wurde die Akustikgruppe der PTR nach Warmbrunn in Schlesien verlagert, und damit war auch ein krasser Wechsel in der zu bearbeitenden Thematik verbunden. Ging es vorher um elektrische und mechanische Analyseverfahren, um die Tonhöhenaufzeichnung von Sprach- und Musikklingen sowie um die Schallabstrahlung von Klavieren, so standen nun Peilverfahren für U-Boote und Flugzeuge im Mittelpunkt. Kurz vor Kriegsende wurde die Gruppe nach Göttingen umgesiedelt, so daß sie bald danach wieder eine gewisse Funktionsfähigkeit erlangen konnte.

Von Göttingen gingen dann auch die entscheidenden Bestrebungen aus, die zu einer Konzentration der verstreuten Kräfte der alten Reichsanstalt in Braunschweig geführt haben. Als Zweigstellenleiter der Göttinger PTR-Gruppe fand Martin Grützmacher die Unterstützung eines ad hoc gebildeten „Präsidialausschusses“, dem neben Max von Laue als Vorsitzendem auch die Physiker Heisenberg, Kopfermann und Pohl angehörten. Nach zähen Verhandlungen, in denen Grützmacher manche peinliche Situation, die sich aus der damaligen „Non-Fraternisation-Ära“ ergab, oft mit Eleganz, aber bisweilen wohl auch nicht ohne „Zähneknirschen“ überspielt hat, konnte dann die ehemalige



Reichsanstalt in Braunschweig auf dem von den Engländern zur Verfügung gestelltem Gelände ihren Wiederaufbau beginnen. Die vorläufige Leitung der Braunschweiger Dienststelle wurde dem damaligen Oberregierungsrat Dr. Grützmacher übertragen.

Bis 1966 hat er die Geschicke der Abteilung Akustik der inzwischen entstandenen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt fest in seinen Händen gehalten, wobei ihn bei aller Konzilianz des Auftretens doch stets sehr klare Zielvorstellungen geleitet haben. Dabei kam es ihm sicherlich zugute, daß er neben seinem Amt in der PTB auch als akademischer Lehrer tätig war. Schon 1944 hatte er sich in Berlin habilitiert, und 1948 wurde er zum Honorarprofessor an der Technischen Hochschule in Braunschweig ernannt. Mehr als 20 Doktoranden, von denen viele in Spitzenstellungen im universitären Bereich, in Forschungsinstitutionen und in der Industrie aufrücken konnten, legen Zeugnis von seiner Leistungsfähigkeit auf diesem Sektor ab.

Ihre äußere Würdigung haben die in vielen Jahrzehnten erworbenen Verdienste Martin Grützachers in zahlreichen Ehrungen und Ernennungen gefunden. 1953 wurde er zum Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft berufen, 1967 erhielt er den DIN-Ehrenring und 1980 das Bundesverdienstkreuz am Bande. Auch nach seiner Pensionierung hat er die Verbindung zur Wissenschaft nie abreißen lassen und sich bis ins hohe Alter aktiv an der Weiterentwicklung insbesondere der Akustik beteiligt. Wer das Glück hatte, ihn näher zu kennen, war fasziniert von seiner sprühenden Lebendigkeit, von seinen vielen geistigen Interessen, seiner Fröhlichkeit, aber nicht zuletzt auch von der Tatsache, daß er bis kurz vor seinem Tod im 93. Lebensjahr regelmäßig Sport getrieben hat, er war ein leidenschaftlicher Tennisspieler und Skifahrer. Wer von den Gästen aus Anlaß seines 90. Geburtstages könnte je vergessen, wie er in seiner Tischrede eine Ode von Horaz in Lateinisch frei vortrug, und sie dann für uns auch noch übersetzte. Sie schließt mit:

Dum loquimur, fugerit invada aetas: Carpe diem, quam minimum credula postero.

Noch während wir hier reden, enteilt die Lebenszeit neidisch im Fluge.  
Genieße das Heute, und traue dem Morgen so wenig wie möglich.

So war er ein Vorbild an geistiger Haltung im hohen Alter.

Am 11. Oktober 1994 beschloß sich sein reich ausgefüllter Lebensweg. Seine Frau folgte ihm nur Tage später.

Dieter Kind

## OTTO ROSENBACH

\* 25.09.1914 † 19.09.1994

Der Lebenslauf Otto Rosenbachs reflektiert in sehr charakteristischer Weise die zeitgeschichtlichen Entwicklungen im Deutschland der beiden Weltkriege und der Zwischen- und Nachkriegszeiten. Als Rosenbach in Tilsit geboren wurde, war der 1. Weltkrieg erst acht Wochen alt. Russische Truppen besetzten das Memelland und Teile Ostpreußens, bis sie sich nach dem deutschen Sieg bei Tannenberg zurückziehen mußten. In den Bereich politischer und militärischer Interessen geriet das Memelland 1919/20, als die neugegründeten baltischen Staaten mit Hilfe deutscher Freikorps und alliierter Interventionstruppen gegen die sowjetischen Kräfte um ihre Unabhängigkeit kämpften. Der Gebietsstreifen nördlich der Memel und der Ruß, wo Otto Rosenbach als Sohn des Volksschullehrers in Schreitlaugken aufwuchs, war durch französische Truppen besetzt, bis er 1923 durch Litauen annektiert wurde. Otto Rosenbach ging von 1921 bis 1925 bei seinem Vater in die Volksschule, dessen didaktisches Geschick er bis an sein Lebensende lobend hervorhob und welches ihm Vorbild war.

Von 1925 bis 1933 besuchte Rosenbach das Realgymnasium in Tilsit und erhielt dort das Abitur. Zum SS 1933 immatrikulierte er sich an der Universität Königsberg und studierte Mathematik, Physik und Biologie. Das SS 1935 verbrachte er an der Universität Würzburg. Der im Deutschen Reich eingeführten Arbeits- und Wehrdienstpflicht war Rosenbach entzogen, da er von 1923 bis zur durch ein Ultimatum der Reichsregierung erzwungenen Rückgliederung des nördlichen Memellandes an Deutschland im März 1939 litauischer Staatsbürger war.

Nach seiner Rückkehr nach Königsberg zum WS 1935/36 schloß er sich dem Dozenten für Meteorologie und Geophysik, H. Lettau, an und begann 1939 eine experimentelle Doktorarbeit mit Doppelpendelmessungen zur Isostasie der Erdkruste. Nach der Prüfung für das Lehramt an höheren Schulen im März 1939 war Rosenbach des Broterwerbs wegen Referendar an der Oberschule in Pillau.

Da Lettau mit Kriegsausbruch als Meteorologe zur Wehrmacht einberufen wurde, konnte Rosenbach nicht mehr an seiner Dissertation weiterarbeiten. Aus diesem Grunde ließ er sich zum 1. April 1940 aus dem Schuldienst entlassen und trat in die Gesellschaft für praktische Lagerstättenforschung (PRAKLA) in Berlin ein, bei der er bis zum 31. Dezember 1945 tätig war. Angewandte Gravimetrie und Seismik waren seine hauptsächlichen Einsatzgebiete. Gegen Ende des Krieges begann er im Benehmen mit dem Professor für Geophysik an der TH Berlin, Dr. H. Reich, eine theoretische Studie zur Gravimetrie über Salzdiapiren, deren Fortführung das katastrophale Kriegsende verhinderte. Über Rosenbachs Tätigkeit als angewandter Geophysiker bei der PRAKLA urteilte Reich, der später Direktor des Instituts für Angewandte Geophysik an der Universität München war, Anfang der fünfziger Jahre wie folgt: „Er hat früher sehr wesentliche und ausgezeichnete geophysikalische Arbeiten für die geophysikalische Reichsaufnahme und während des Krieges besonders auch in der Ukraine und im Elsaß durchgeführt. Seine wissenschaftlichen Arbeiten zeigen, daß er mit den schwierigen Problemen der

Schweremessungen aufs beste vertraut ist. Er hat darüber in verschiedenen, allgemein anerkannten Arbeiten der Öffentlichkeit gezeigt, was er auf diesem Gebiete kann und hat sich damit die allgemeine Achtung und Zustimmung der Kollegen erworben. Was bei Herrn Dr. Rosenbach besonders wichtig ist, ist der Umstand, daß er, obwohl er nach seinem Studiengang in der Hauptsache mit der Theorie und der Mathematik verbunden ist, es verstanden hat, in der Praxis den Weg zu der Anwendung auf geologische Probleme in einer Art und Weise zu finden, die anderen Theoretikern versagt geblieben ist. Seine Berichte, die ich von früher her kenne, sind ebenso wie seine Veröffentlichungen klar verständlich abgefaßt und haben immer das Wesentliche vom Unwesentlichen getrennt.“

Rosenbach fand sich nach Kriegsende auf dem Lande bei Göttingen wieder. Er hatte Elternhaus und Heimat verloren, und seine Ehe mit Eva Niklas zerbrach in den Wirren jener Zeit, in der sich zeitweilig nahezu jede menschliche Ordnung auflöste.

Am 1. Februar 1946 konnte Rosenbach seinem auf die Promotion gerichteten Wunsch ein Stück näherkommen, indem er die Stelle eines wissenschaftlichen Assistenten am Mathematischen Seminar der landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn besetzen konnte. Bereits drei Semester später legte er eine Dissertation: „Über gravimetrische Wirkungen von zylinderförmigen Massenbettungen“ vor und wurde am 17. Juli 1947 zum Doktor-Ingenieur promoviert. Am 18. Juli 1951 erfolgte seine Habilitation in Bonn aufgrund seiner Schrift: „Theoretische Untersuchungen zum Problem der Isostasie.“ Seine *venia legendi* lautete auf Angewandte Geophysik.

Am 22. Dezember 1952 ging Rosenbach die Ehe mit der aus Heidelberg stammenden Lore Kuckuk ein. Aus der Ehe gingen der Sohn Klaus-Dieter (1959) und die Tochter Susanne (1962) hervor.

Im SS 1955 erhielt Rosenbach einen besoldeten Lehrauftrag für „Geophysik“ an der Universität Mainz, wo ihm am 1. September 1955 eine beamtete Diätendozentur übertragen wurde, die dem Institut für Meteorologie und Geophysik zugeordnet war. Nach der Ernennung zum außerplanmäßigen Professor erfolgte am 18. September 1962 die Berufung auf einen außerordentlichen Lehrstuhl für Geophysik in Mainz.

Nach der Vertretung der ordentlichen Professur für Geophysik an der Bergakademie Clausthal-TH im WS 1964/65 wurde Rosenbach am 6. Mai 1965 zum ordentlichen Professor und Institutsdirektor an der Bergakademie-TH ernannt.

Im Mai 1968 erhielt er einen Ruf auf die ordentliche Lehrkanzel für Geophysik an der TH Wien. Bei Bleibeverhandlungen im Ministerium erreichte er, daß der für die Geophysik geplante Institutsneubau vorzugsweise in den Haushaltsausschuß des Landtags eingebracht und ihm eine Reihe von Stellenzusagen gegeben wurden. So entstand ein komfortabler, mit modernsten Apparaturen ausgerüsteter Neubau von rund 1700 qm Nutzfläche im Campus der TU Clausthal, der in der Bundesrepublik seinesgleichen sucht. Betrug die Zahl der Studenten der Geophysik bei Bezug des Neubaus 57, so verdoppelte sie sich bis zum Ausscheiden Rosenbachs aus dem aktiven Dienst und stieg bis Mitte der achtziger Jahre auf mehr als 160 an. Damit nahm die Clausthaler Geophysik in der Bundesrepublik die Spitzenposition ein. Während Rosenbachs Direktorat vermehrte sich die Zahl der planmäßigen Professuren für Geophysik von einer auf drei und das wis-

senschaftliche und technische Personal dementsprechend. Das Clausthaler seismologische Observatorium wurde Station im internationalen Erdbeben-Beobachtungsnetz.

Dies alles wurde nur möglich, weil sich Rosenbach in Vorstandsfunktionen nationaler und internationaler geophysikalischer Institutionen und Verbände wählen ließ. Sechs Jahre lang hatte er in drei dieser Institutionen den Vorsitz. Er war Gutachter für die DFG, das BMFT, die VW-Stiftung und gehörte 15 Jahre lang den Auswahlkommissionen des DAAD an. Aus allen diesen Aufgaben ergaben sich weltweite Kontakte, die ihn zu Forschungsaufenthalten und in Gastprofessuren an Universitäten in vielen Ländern der Welt führten.

Selbstverständlich stellte er sich auch den Aufgaben der akademischen Selbstverwaltung als Mitglied der verschiedenen Gremien, als Vorsitzender der Abteilung Geowissenschaften und als Dekan der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der TU Clausthal.

Rosenbach war stolz darauf, daß er mehr als 90 DFG-Forschungsvorhaben, ohne je eine Ablehnung zu erfahren, erfolgreich durchgeführt hat. Noch mehr stellte es ihn aber zufrieden, daß er mit diesen Mitteln mehr als 150 seiner Schüler fördern konnte. Fast ein Fünftel seiner etwa 50 Doktoranden gelangte in Professuren oder Dozenturen, viele in leitende Positionen der Industrie.

Kurz vor seinem Tode beurteilte Rosenbach sein Lebenswerk folgendermaßen: „Meine Forschungsarbeiten waren nichts besonderes. Mein akademisches Leben hatte vorrangig das Ziel, mich um eine gute Ausbildung zu kümmern, Nachwuchskräfte für die wissenschaftliche Arbeit zu formieren, und dies durch überschaubare, einprägsame Vorlesungen und Übungen.“ Für die Praktika beschaffte er modernste Apparaturen, um die Studierenden möglichst gut auf die kommende Berufspraxis vorzubereiten. Otto Rosenbach war nicht nur ein guter akademischer Lehrer, sondern ein ausgezeichnete Wissensmanager seines Faches.

Meist mit seinen Schülern gemeinsam publizierte Rosenbach etwa 60 wissenschaftliche Artikel und erarbeitete mit Strobach und Heitz die 1967 erschienene Denkschrift der DFG zur „Physik des Erdkörpers“.

In die Klasse für Naturwissenschaften und Mathematik der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft wurde Herr Rosenbach im Jahre 1973 als ordentliches Mitglied gewählt. Er leitete die Klasse in den Jahren 1990/91.

Er verstarb eine Woche vor der Vollendung seines achtzigsten Lebensjahres in Braunschweig.

Georg Müller

## HELMUT WOLF

\* 02.05.1910 † 06.06.1994

Der Verlust eines guten Freundes bringt schwere und lange Betrübnis. Schon am 06.06.1994 verschied unser korrespondierendes Mitglied Helmut Wolf, Emeritus der Universität Bonn. Er war einer der hervorragenden Hochschullehrer für Theoretische Geodäsie mit internationaler Geltung.

Sein Studium an der TH Dresden schloß er als Dipl.-Ing. (1933) und mit Promotion zum Dr.-Ing. (1936) ab. Gegen Ende des 2. Weltkrieges (1944/1945) war er dienstverpflichtet an die Universität Göttingen für das Gebiet der Angewandten Mechanik. Vorher war Helmut Wolf Mitarbeiter beim Reichsamt für Landesaufnahme in Berlin (1934–45), nachher beim Institut für Erdmessung in Bamberg (1945–54).

Danach begann seine Lehrtätigkeit an den Universitäten Bamberg, Karlsruhe, Frankfurt a.M. und Bonn, wo er seit 1955 als Ordinarius und Direktor des Instituts für Theoretische Geodäsie bis zu seiner Emeritierung (1978) segensreich wirkte. Die Bonner Fachrichtung für Geodäsie wird noch lange die Handschrift von Helmut Wolf tragen und dankbar anerkennen, daß er Berufungen nach Berlin, Aachen und Frankfurt a.M. abgelehnt hatte.

Seine weit über 200 wissenschaftlichen Veröffentlichungen erstrecken sich vor allem über die Ausgleichung von kontinentalen Dreiecks-, Nivellements- und Schwerenetzen nach der Methode der kleinsten Quadrate bis hin zur Satelliten-Triangulation. Daneben vollendete er 3 Bücher über Ausgleichungsrechnung. Er war ein hochgeachteter Teilnehmer an den weltweiten Konferenzen der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) sowie der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG).

Den Teilnehmern des wissenschaftlichen Kongresses der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft anlässlich der 200. Wiederkehr des Geburtstages von Carl Friedrich Gauß (1977) wird der exzellente Vortrag „Funktionale und stochastische Modelle für das Europäische Dreiecksnetz mit ihrer Bezugnahme auf C. F. GAUSS“ von Helmut Wolf in bester Erinnerung bleiben.

Erwähnenswert sind die Helmut Wolf erfahrenen Auszeichnungen und Ehrungen, so wurde er ordentliches Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK) bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften München (1951), korrespondierendes Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften München (1968), Dr. h.c. der ETH Zürich (1970), Träger der Helmert-Gedenkmünze des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (1975), Dr. h.c. der Universität Uppsala (1976), korrespondierendes Mitglied der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien (1978), Ehrendoktor der Universität Zagreb (1981) und der TU Yildiz (1993).

Bei seiner hervorragenden wissenschaftlich-schöpferischen Tätigkeit war Helmut Wolf stets ein gütiger, bescheidener, lebenswerter Mensch. Ich hatte das große Glück, zu seinen Freunden zu gehören. Noch aus der Klinik, kurz vor seinem Tode, erhielt ich seine Grüße zu meinem 90. Geburtstag und eine Schilderung seiner inoperablen Leiden. Wir alle verbleiben in tiefer Trauer mit seiner verehrten Gattin Magdalene, geb. Taube. Der Herr sei mit ihm.

Karl Gerke

## EDGAR R. ROSEN

\* 18.6.1911 † 10.12.1994

Am 10. Dezember des vergangenen Jahres verstarb nach mehrjährigen gesundheitlichen Bedrängnissen unser ordentliches Mitglied in der Klasse für Geisteswissenschaften

Prof. Dr. phil. Edgar R. Rosen.

Mit ihm hat die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft einen ihrer über Deutschland hinaus bekannten und anerkannten Gelehrten verloren, der nicht so bald und nur schwer zu ersetzen sein wird.

Edgar Robert Rosen wurde als Sohn des amerikanischen Zahnarztes Dr. Jaky Rosen und dessen Ehefrau Margot, geb. Loewinberg – beide mosaischer Konfession –, am 18. Juni 1911 in Berlin geboren. Als einziges Kind seiner Familie verlebte er seine Kinder- und ersten Jugendjahre in seinem Elternhaus. Nach Privatunterricht und 1920 bis 1924 Besuch des Wilhelm-Gymnasiums, dessen Reste in das Gebäude des Französischen Gymnasiums verlegt wurden, absolvierte Rosen den Rest seiner Schulzeit auf eigenen Wunsch in der letztgenannten renommierten Anstalt. Diese ging auf das zur Zeit der Hugenottenzuwanderung gegründete Collège Français zurück, welches später seinen heutigen Namen erhielt. Der Unterricht wurde an dieser Schule in französischer und in deutscher Sprache bei entsprechend gemischtem Kollegium erteilt. Sie vermittelte ihren Schülern, den „Collegianern“, ein weltoffenes, weitgespanntes gesellschaftliches, politisches, wirtschaftliches und kulturelles Wissen unter Förderung der individuellen Entwicklung. Es darf unterstellt werden, daß Rosens politisches Interesse und seine wissenschaftlichen Ziele und Arbeiten nicht unwesentlich durch diese Schule zumindest mitbestimmt worden waren.

In einer erinnernden Veröffentlichung: „Politische Jugendimpressionen im späten Kaiserreich und der Weimarer Republik“ hat Rosen seine entsprechende Entwicklung geschildert, die ihn uns als regelmäßigen Konsumenten ausländischer und deutscher Zeitungen mit engagierter Anteilnahme an den politischen Entwicklungen zeigt. Sein so entstehendes Zeitbild wurde durch einige Reisen in die Schweiz und Norditalien noch erweitert und gefestigt.

Nach dem 1929 bestandenen Abitur begann Rosen an der Berliner Universität Rechts- und Staatswissenschaft sowie Geschichte zu studieren. Sein Interesse galt dabei vor allem der Entwicklung des Nationalismus in Italien und Deutschland – beide Staaten hatten erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts ihre nationale Einheit erreicht – wobei die Ablösung überkommener Formen extreme Entwicklungen anzeigte. Da Italien in dieser Entwicklung noch vor Deutschland rangierte, legte Rosen 1933 zum Abschluß seines Studiums bei Prof. W. Götz an der Universität Leipzig seine Dissertation „Der Faschismus und seine Staatsidee – ein Beitrag zur Geistesgeschichte des neuen Italien“ vor und wurde, erst 21jährig, zum Doktor der Philosophie promoviert. Das Thema seiner Dissertation hat ihn übrigens nicht losgelassen, es hat sein wissenschaftliches Wirken bis an sein Lebensende begleitet.

In Deutschland hatte sich mittlerweile die Machtergreifung durch die extrem nationalistische NSDAP vollzogen. Die daraus resultierenden Verhältnisse erzwangen nur zu bald die Emigration Rosens in die Vereinigten Staaten von Amerika (1937). Für ihn, der ja Bürger dieses Staates war, ergaben sich dabei keine besonderen Schwierigkeiten, wohl aber hinsichtlich seiner jungen Frau Edith, geb. Mühsam, mit der er kurz zuvor in Köln die Ehe geschlossen hatte.

Nach der amerikanischen Gesetzeslage erhielt die Ehefrau mit der Eheschließung nicht automatisch die Staatsbürgerschaft ihres Ehemannes. So mußte Rosen die Einwanderungsgenehmigung in die Staaten für seine Ehefrau beantragen, wobei ihm Freunde durch Bürgschaften halfen, so daß ihm seine Frau in die USA nachfolgen konnte.

In New York, wohin die Rosens ausgereist waren, begannen die ersten besonders schweren Jahre des Exils, die noch weiter dadurch erschwert wurden, als die aus Deutschland Ausreisenden nur RM 10,00 pro Person ausführen durften und sie in New York auf keinerlei Rücklagen zurückgreifen konnten.

Die USA gewährte allenfalls prominenten Flüchtlingen großzügige Unterstützungen, und fördernde Vereinigungen verschiedener Art unterstützten nur ausländische Exilanten. Amerikanische Staatsbürger, wie die Rosens, hatten für ihren Lebensunterhalt, wie alle Amerikaner, selbst zu sorgen. Beide Eheleute mußten alle sich bietenden Verdienstmöglichkeiten wahrnehmen, was unter den ihnen doch fremden Verhältnissen besonders schwierig war. Rosen selbst gelang es schließlich, eine journalistische Tätigkeit aufzubauen. Mit zunehmendem Interesse der USA an europäischen, insbesondere an italienischen Verhältnissen konnte er bei dem angesehenen Presseorgan *Christian Science Monitor* Fuß fassen, in welchem ihm als außenpolitischem Mitarbeiter 1947 sogar ein Resort für mitteleuropäische Wirtschaftsfragen anvertraut wurde.

In der Zeit von 1942 bis 1948 hat der *Monitor* rund 200 zum Teil größere Beiträge aus Rosens Feder publiziert. Die meisten von ihnen befassen sich mit den italienischen Verhältnissen aus jener Zeit, also mit der Beteiligung Italiens am zweiten Weltkrieg, mit dem Übergang eines Teils des Landes zu den Alliierten, deutsche Besetzung des Landes, Partisanenkampf, Abzug der deutschen Armeen, Beseitigung der Reste des Faschismus und schließlich Ablösung der Monarchie und Schaffung der Republik Italien und deren erste Politik. Bei alledem kamen Rosen seine italienischen Sprachkenntnisse zugute.

Über einen wissenschaftlichen Informationsdienst bekam Rosen 1948 Verbindung zur späteren Staatsuniversität von Missouri in Kansas City und die Möglichkeit, zur wissenschaftlichen Tätigkeit zurückzukehren. Er erhielt dort eine Stelle zunächst als „Assistant“ und schließlich als „Full“ Professor für „History and Government“, die er bis 1965 bekleidete. Sobald dies möglich war, nahm er nach Kriegsende Verbindung mit deutschen wissenschaftlichen Institutionen und Kollegen auf und reiste mehrmals in seine alte Heimat. 1954/55 vertrat er für ein ganzes Jahr Prof. Flechtheim an der Hochschule für Politik in Berlin. 1959/60 erhielt er eine Gastprofessur am Otto-Suhr-Institut in Berlin. Rufe dorthin lehnte er aus familiären Gründen ab, konnte aber im Sommersemester 1963 Prof. Eschenburg in Tübingen vertreten.

1965 folgte er dann dem Ruf auf den neu errichteten Lehrstuhl für Politikwissenschaft an der Technischen Hochschule Carolo Wilhelmina zu Braunschweig. Hier bot sich ihm

die Möglichkeit, ein Lehr- und Forschungsgebiet nach seinen vielfältigen internationalen Erfahrungen auf- und auszubauen. Es wurde von den Studierenden für das höhere Lehramt stürmisch begrüßt und intensiv genutzt, zumal Rosens Lehrveranstaltungen durch ihre Inhalte von weltpolitischem Rang dem damaligen neuen Politikverständnis der jungen Generation entgegenkamen.

Die wichtigsten wissenschaftlichen Veröffentlichungen Rosens stammen aus den fünfziger und sechziger Jahren. Sie weisen ihn eindeutig als hochqualifizierten Spezialisten für die neuere italienische Geschichte und Politik aus, wobei er im Hinblick auf die Kriegsverhältnisse die vorsorglichen Abwehrmaßnahmen der Schweiz – „Alpenfestung“ und „Ruetli-Schwur“ – gegen mögliche Angriffe aus dem Norden wenigstens in Umrissen dargestellt hat. Besonders zu erwähnen ist schließlich noch seine gründliche Bearbeitung wichtiger Dokumentensammlungen, die vor allem wieder Italien betreffen.

Neben seiner Lehr- und Forschungstätigkeit übernahm Rosen die Redaktion der vom Braunschweiger Hochschulbund finanzierten „Mitteilungen der Carolo-Wilhelmina“, die er bis zu seinem Tode wahrnahm. Unter seiner Leitung hat sich die Zeitschrift, die Beiträge aus allen Fachgebieten der Technischen Universität enthielt, zu einer der bedeutendsten Universitätszeitschriften Deutschlands entwickelt. Und noch eine weitere „Nebentätigkeit“ Rosens verdient besondere Erwähnung. Literarisch engagiert, befaßte er sich mit dem Schaffen Fontanes. Er gab dessen Briefwechsel mit seiner Tochter Mete, der bereits in mehreren Auflagen erschienen ist, heraus, und noch kurz vor seinem Tode veröffentlichte er eine Würdigung dieses märkischen Schriftsteller-Dichters unter dem Titel „Fontanisches“. Darüber hinaus wirkte er bei einem Ersatz für ehemalige „Verlagsalmanache“ mit, indem er der von der Berliner Buchhandlung Elwer und Meurer verlegten „Begegnung“ (das gedruckte Schaufenster) wesentliche und umfangreiche Beiträge zuwendete.

Rosen hat manche Erfahrungen erfahren. Er war Mitglied

der American Historical Association,  
der International Political Science Association,  
der allgemeinen geschichtsforschenden Gesellschaft der Schweiz und  
der Deutschen Vereinigung für politische Wissenschaft.

1975 wurde er zum ordentlichen Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in der Klasse für Geisteswissenschaften gewählt. Er hat diese Berufung sehr ernst genommen und durch zwei Beiträge im Plenum und fünf in seiner Klasse rege an der Tätigkeit der Gesellschaft mitgewirkt; sie sind in den Veröffentlichungen der BWG publiziert worden und betreffen wiederum italienische Fragen und damit zusammenhängende schweizerische Konsequenzen. Seine Mitgliedschaft in unserer Gesellschaft eröffnete ihm aber auch die Möglichkeit zur Ausweitung seines Kollegenkreises. Wenn seine gesundheitlichen Verhältnisse in den letzten Jahren seine Teilnahme an den Sitzungen auch oft verhinderten, so dienten mitunter sehr lange Ferngespräche der Aufrechterhaltung und Vertiefung der kollegialen Kontakte.



In den letzten Jahren seines Wirkens befaßte sich Rosen nochmals mit einer Forschungsarbeit. Mit dieser unter dem Titel „Königreich des Südens“ schließt sich der Kreis, der einst von seiner Dissertation über den italienischen Faschismus seinen Ausgang genommen hatte. Die Arbeit war auf drei Folgen angelegt, von denen zwei abgeschlossen und in den Forschungsberichten der BWG veröffentlicht worden sind.

Die letzte Folge hat Rosen nicht mehr vollenden können, es bleibt zu erwägen, ob sie auf der Basis der Rosenschen Aufzeichnungen nicht von einem geeigneten Kollegen abgeschlossen werden sollte. „Königreich des Südens“ faßt noch einmal die Erkenntnisse zusammen, die ein lebenslanges Quellenstudium sowie Veröffentlichungen der verschiedensten Art ergeben haben. Sie zeigen, wie der Ausgang des Krieges und die damit verbundenen gesellschaftspolitischen Umwälzungen zur Beseitigung des Königreiches und zur Gründung der Republik Italien geführt haben. Für sein gerade in diesem Werk zutage tretendes Engagement für Italien und dessen neuere Geschichte hat der Präsident der Republik Italien Rosen die Auszeichnung eines „Cavaliere nell ordine al merito della Repubblica Italiana“ verliehen und damit Rosens wissenschaftspolitischem Wirken die letzte hochverdiente Ehrung den vorangegangenen hinzugefügt.

Rosens Leben und Wirken war streckenweise durch ein schweres Schicksal bestimmt. Seine hochbegabte Persönlichkeit hat es dennoch eindrucksvoll geprägt. Er selbst, sein Wirken und seine Werke werden in den Annalen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft fortleben, die, sich seiner erinnernd, ihm stets ein ehrendes Gedenken bewahren wird.

Karl Heinrich Olsen

## WALTER RENARD

\* 12.5.1904 † 31.3.1994

Professor Renard wurde als Pastorensohn in Chemnitz/Sa. geboren. Nach der Schulzeit folgte das Maschinenbaustudium an der TH Dresden mit dem Abschluß des Diplomexamens im Jahre 1928. Von 1929 bis 1934 war Prof. Renard am Landmaschineninstitut der Universität Leipzig und gleichzeitig Leiter der Maschinenberatungsstelle der Landwirtschaftskammer Sachsen. Während der Assistentenzeit an der Universität bearbeitete er Probleme der Bodenfräsen sowie der mechanischen Untergrundlockerung. 1934/35 übernahm er die Leitung der Maschinen-, Geräte- und Bauabteilung in der Hauptverwaltung des Reichsnährstandes Berlin. Im Jahre 1936 folgte der Ruf als Professor für Landtechnik an der Universität Leipzig.

Nach der Entlassung aus dem Militärdienst baute sich Prof. Renard in Oldenburg mit einem eigenen Ingenieurbüro eine neue Existenz auf. 1949 erfolgte die Berufung zum o. Professor und Direktor des neu gegründeten Institutes für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft an der Hochschule für Gartenbau und Landeskultur, die später als Fakultät IV in die Technische Hochschule Hannover übernommen wurde. Durch den unermüdlichen Einsatz seiner ganzen Arbeitskraft und seines Könnens baute Prof. Renard das Institut auf, so daß es schon bald einen ansehnlichen Ruf sowohl in der Wissenschaft des In- und Auslandes als auch besonders in der gärtnerischen Praxis genoß.

Durch die praxisorientierten Forschungen im Institut wurde die technische Entwicklung im Gartenbau seit 1950 maßgeblich beeinflußt. Forschungsschwerpunkt des Institutes wurde die Gewächshaustechnik, die Klimatisierung der Gewächshäuser, die Klimaregelung sowie die Heizungstechnik. Auf allen diesen Gebieten wurden nach den Ideen von Prof. Renard von ihm und den Mitarbeitern des Institutes in die Zukunft weisende Forschungsergebnisse erarbeitet. Als Beispiel seien nur die schon Mitte der fünfziger Jahre begonnenen Arbeiten über den Wärmeverbrauch von Gewächshäusern und die daraus abgeleiteten Maßnahmen zur Verringerung der Heizenergie durch die Anordnung der Heizsysteme und durch Maßnahmen an der Gewächshaushüllfläche wie Folienunterspannung und Doppelverglasung genannt. Schon 1959 ist das erste Gewächshaus mit Doppelverglasung gebaut und der Wärmeverbrauch gemessen worden.

Schon lange vor der sogenannten Energiekrise wurde der Einfluß der Heizungssysteme auf den Energieverbrauch und die damit verbundene mögliche Energieeinsparung untersucht. Die Klimafaktoren im Gewächshaus sowie die technischen Einrichtungen zur Beeinflussung und Regelung dieser Klimafaktoren wurden systematisch erforscht. Hier sind in Arbeiten über die Lichtdurchlässigkeit von Gewächshäusern, über die Lüftung, Kühlung, Schattierung und Bewässerung wesentliche Grundlagen erarbeitet worden. Die Arbeiten über die Konstruktion und Statik der Gewächshäuser sowie über den Windeinfluß haben den Gewächshausbau mit geprägt und sind auch die wesentliche Grundlage für die DIN 11 536 über das Deutsche Normgewächshaus gewesen. Schon frühzeitig hat Prof. Renard die Bedeutung der Kunststoffe für den Gartenbau erkannt und auch hier wesentliche Beiträge geliefert.

Die Vielzahl der Forschungsergebnisse fand ihren Niederschlag in zahlreichen eigenen Veröffentlichungen und Vorträgen im In- und Ausland sowie in den von ihm betreuten Dissertationen. Außerdem hat Prof. Renard erstmals für den technischen Teil des Gartenbaulexikons im Parey-Verlag einen Überblick über die Technik im Gartenbau geschaffen.

Neben der eigentlichen Forschungs- und Lehrtätigkeit hat Prof. Renard viele erfolgreiche Ausstellungen und Vorführungen organisiert und damit der Praxis die jeweiligen technischen Neuentwicklungen der Industrie zusammenfassend vorgestellt. Diese Tätigkeit führte dazu, daß er zum Präsidenten des Kuratoriums und des Ausstellerbeirates der Technikausstellung für den Gartenbau in Karlsruhe berufen wurde. In zehn Jahren hat Prof. Renard ganz wesentlich zur Bedeutung der „hortec“ beigetragen. Darüber hinaus engagierte er sich sehr in Ausschüssen des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft und des Zentralverbandes Gartenbau sowie auch in Normenausschüssen.

In den Jahren 1964/65 und nach Wiederwahl bis 1966 hat Prof. Renard als Rektor der TH Hannover die gesamte Hochschule mit vollem persönlichen Einsatz und großem Geschick geleitet. Prof. Renard war Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft und hat auch in der VDI-Fachgruppe Landtechnik durch seine Arbeiten wesentliche Impulse geben können.

1984 wurde ihm das Bundesverdienstkreuz 1. Klasse verliehen.

Christian von Zabeltitz

## Zuwahlen

Zu ordentlichen Mitgliedern wurden am 07.04.1995 gewählt:

### in die Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften

**Glaßmeier**, Karl-Heinz, Dr. rer. nat., Univ.-Prof. für Geophysik an der TU Braunschweig.  
Friedrich-Löffler-Weg 13, 38116 Braunschweig

1954, 28.04. geboren in Münster/Westfalen  
1973 Abitur, Ratsgymnasium Münster  
1973–1979 Studium der Fächer Physik und Geophysik an der Universität Münster, Abschluß Dipl.-Phys.  
1980–1985 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geophysik der Universität Münster  
1985 Promotion an der Universität Münster  
1985–1990 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geophysik der Universität Köln  
1989 Habilitation für Geophysik an der Universität Köln  
1990–1991 Hochschuldozent an der Universität Köln  
seit 1991 Univ.-Prof. (C 4) an der TU Braunschweig  
Publikationen: ca. 100 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften  
Herausgabe: Glaßmeier, K.-H., M. Scholer (Hrsg.): Plasmaphysik im Sonnensystem, Mannheim 1991

**Görlitzer**, Klaus, Dr. rer. nat., Univ.-Prof. für Pharmazeutische Chemie an der TU Braunschweig.  
Waterloostraße 15, 38106 Braunschweig

1940, 29.07. geboren in Guben (Brandenburg)  
1959 Abitur, Arndt-Gymnasium Berlin  
1959–1961 Praktikant an Apotheken  
1961–1964 Studium der Pharmazie an der FU Berlin, Abschluß Pharmazeutisches Staatsexamen  
1965 Bestallung als Apotheker  
1964–1970 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Pharmazie der FU Berlin  
1968 Promotion an der FU Berlin  
1970–1977 Assistenzprofessor, FU Berlin  
1976 Habilitation für Pharmazeutische Chemie an der FU Berlin  
1977–1985 Professor (C 2) am Institut für Pharmazie der FU Berlin  
seit 1985 Univ.-Prof. (C 4) an der TU Braunschweig  
Publikationen: Mehr als 100 Aufsätze in Fachzeitschriften.  
Buchveröffentlichung: Fresenius – Görlitzer: Organisch-chemische Nomenklatur, Stuttgart 1991

**Heidberg, Joachim**, Dr. phil. nat., Univ.-Prof. für Physikalische Chemie an der Universität Hannover.  
Zuckmayerstraße 9, 30453 Hannover

- 1933, 30.01. geboren in Breslau  
 1951 Abitur, Ernestinum Coburg  
 1951–1959 Studium von Chemie und Physik an den Universitäten Erlangen und Frankfurt, Abschluß Dipl.-Chem.  
 1959–1962 Stipendiat der Studienstiftung  
 1962 Promotion an der Universität Frankfurt  
 1962–1964 Resident Research Associate, Argonne National Laboratory (University of Chicago)  
 1964–1971 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Physikalische Chemie der Universität Frankfurt  
 1972 Habilitation für Physikalische Chemie an der Universität Frankfurt  
 1972 Professor, Universität Frankfurt  
 1973–1981 Professor (C 3) Universität Erlangen – Nürnberg  
 seit 1981 Univ.-Prof. (C 4) an der Universität Hannover  
 Publikationen: 190 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften  
 Herausgabe: (mit H. Hartmann, H. Heydtmann, G. Kohlmaier): Chemische Elementarprozesse, Springer 1986. Investigationes Hermann Hartmann, 1979

### in die Klasse für Ingenieurwissenschaften

**Wiendahl, Hans-Peter**, Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h., Univ.-Prof. für Arbeitsmaschinen und Fabrikanlagen an der Universität Hannover.

Am Winkelberge 6, 30826 Garbsen

- 1938, 11.02. geboren in Wickede/Ruhr  
 1945–1954 Volks- und Realschule in Dortmund  
 1954–1957 Facharbeiterausbildung Hoesch AG Dortmund  
 1957–1959 Staatliche Ingenieurschule Dortmund, Abschluß Ingenieur  
 1959–1961 Konstrukteur Hoesch AG Dortmund  
 1961–1966 Studium des Maschinenbaus an der RWTH Aachen, Abschluß Dipl.-Ing.  
 1967–1972 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, dann Oberingenieur am Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der RWTH Aachen  
 1970 Promotion RWTH Aachen  
 1972 Habilitation RWTH Aachen  
 1972–1974 Hauptabteilungsleiter Planung und Qualität der Firma Escher Wyss GmbH Ravensburg  
 1975–1979 Leiter Technik der Branche Papiermaschinen Escher Wyss GmbH Ravensburg  
 seit 1979 Univ.-Prof. (C 4) an der Universität Hannover  
 Publikationen: 231 Aufsätze in Fachzeitschriften  
 Buchveröffentlichungen:  
 Betriebsorganisation für Ingenieure, München 1989  
 Belastungsorientierte Fertigungssteuerung, München 1987  
 (als Hrsg.) Anwendung der Belastungsorientierten Fertigungssteuerung, München 1992

**Zenner, Harald, Dr.-Ing., Univ.-Prof. für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit an der TU Clausthal.**

Siebensternweg 22, 38678 Clausthal-Zellerfeld

1938, 08.07. geboren in Meißen

1956 Abitur, Meißen

1956–1963 Studium des Maschinenbaus in Karl-Marx-Stadt, Dresden und Stuttgart,  
Abschluß Dipl.-Ing.

1963–1971 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Staatlichen Materialprüfungsanstalt der  
TU Stuttgart

1970 Promotion an der TU Stuttgart

1971–1979 Wissenschaftlicher Bearbeiter in der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH  
Ottobrunn, Gruppenleiter Schwingfestigkeit

1979–1985 Abteilungsleiter für Bauteilfestigkeit in der Technischen Entwicklung der Audi  
NSU Auto Union Ingolstadt

seit 1985 Univ.-Prof. (C 4) an der TU Clausthal

**Publikationen:** 77 Aufsätze in Fachzeitschriften

Buchveröffentlichung:

(gemeinsam mit H. Gudehus): Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung,  
Verlag Stahleisen 1995

### **in die Klasse für Geisteswissenschaften**

**Warncke, Carsten-Peter, Dr. phil., Univ.-Prof. für Kunstgeschichte an der TU Braunschweig.**

Neue Straße 30, 38300 Wolfenbüttel

1947, 21.06. geboren in Hamburg

1968 Abitur, Gymnasium Uhlenhorst-Barmbek in Hamburg

1968–1975 Studium der Kunstgeschichte, Klassischen Archäologie und Literaturwissen-  
schaften an den Universitäten Hamburg, Wien und Heidelberg

1975 Promotion an der Universität Hamburg

1976–1978 Stipendiat der Stiftung Volkswagenwerk an der Herzog-August-Bibliothek Wol-  
fenbüttel

1978–1987 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, dann Hochschulassistent an der Bergischen Uni-  
versität – Gesamthochschule Wuppertal

1985 Habilitation

1987–1989 Prof. C 2 auf Zeit für Kunstgeschichte an der Universität Göttingen

1989–1992 Univ.-Prof. (C 3) für Kunstgeschichte an der Universität Tübingen

seit 1992 Univ.-Prof. (C 4) an der TU Braunschweig

**Publikationen:** ca. 20 Aufsätze in Fachzeitschriften und Sammelbänden

Buchveröffentlichungen:

Die ornamentale Groteske in Deutschland, 2 Bde., Berlin 1979.

Bavaria Sancta – Heiliges Bayern. Die altbayerischen Patrone aus der Heiligen-  
geschichte des Matthaeus Rader, Dortmund 1981.

Sprechende Bilder – sichtbare Worte. Das Bildverständnis in der frühen Neuzeit,  
Wiesbaden 1987.

Das Ideal als Kunst. De Stijl 1917–1931, Köln 1990.  
Picasso, 2 Bde., Köln 1991

Herausgabe: Gabriel Rollenhagen, Sina-Bilder, Dortmund 1983.  
Ikonographie der Bibliotheken, Wiesbaden 1992.

Zu korrespondierenden Mitgliedern wurden am 07.04.1995 gewählt:

#### **in die Klasse für Ingenieurwissenschaften**

**Zumpe**, Günter, Dr.-Ing. habil., Univ.-Prof. für Mechanik an der TU Dresden

#### **in die Klasse für Geisteswissenschaften**

**Poeschke**, Joachim, Dr. phil., Univ.-Prof. für Kunstgeschichte an der Universität Münster

Zum ordentlichen Mitglied wurde am 08.12.1995 gewählt:

#### **in die Klasse für Ingenieurwissenschaften**

**Lindmayer**, Manfred, Dr.-Ing., Univ.-Prof. für Elektrische Energieanlagen an der TU Braunschweig.

Am Papenholz 15, 38104 Braunschweig

1941, 04.10.	geboren in Schopfheim (Südbaden)
1960	Abitur in Aschaffenburg
1960–1966	Studium der Elektrotechnik an der TU München, Abschluß Dipl.-Ing.
1966–1975	Wissenschaftlicher Assistent, dann Oberingenieur am Institut für Elektrische Energieanlagen der TU Braunschweig
1972	Promotion an der TU Braunschweig
1975–1981	Industrietätigkeit als Leiter der Anwendungstechnik Elektrotechnik bei der Degussa AG, Hanau
seit 1981	Univ.-Prof. (C 4) an der TU Braunschweig
Publikationen:	ca. 100 Aufsätze in Fachzeitschriften
Herausgabe:	Schaltgeräte – Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise. Springer Verlag, Berlin 1987

Zum korrespondierenden Mitglied wurde am 08.12.1995 gewählt:

#### **in die Klasse für Ingenieurwissenschaften**

**Kärner**, Hermann C., Dr.-Ing., Univ.-Prof. (C 4) für Hochspannungstechnik an der TU Braunschweig

### Inhaber der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 1949–1995

- 1949 *Walter Reppe* †, Dr. phil., Dr. phil. nat. h.c., Dr.-Ing. E.h., Honorarprofessor der Universität Mainz und der Technischen Hochschule Darmstadt.
- 1950 *Arvid Hedvall* †, fil. dr., Dr. phil. h.c., Dr.-Ing. h.c., Dr. Techn. h.c., em. o. Professor für Silikatchemie der Technischen Hochschule Göteborg/Schweden.
- 1951 *Wilhelm Nusselt* †, Dr.-Ing. E.h., em. o. Professor für Theoretische Maschinenlehre an der Technischen Hochschule München.
- 1952 *Erwin W. Müller*, Dr.-Ing. habil., Dr. rer. nat. h.c., Dr. h.c., Evan-Pugh Res. Professor an der Pennsylvania State University, University Park, Penn./USA.
- 1953 *Gustav Wolf* †, Dr.-Ing. E.h., Professor in Münster.
- 1954 *Max Strutt* †, Dr. techn., Dr.-Ing. E.h., o. Professor für Höhere Elektrotechnik an an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich/Schweiz.
- 1955 *Fritz Arndt* †, Dr. phil., Dr. rer. nat. h.c., Dr. h.c., ein. o. Professor für Organische Chemie an der Universität Breslau, Honorarprofessor an der Universität Hamburg.
- 1955 *Pascual Jordan* †, Dr. phil., em. o. Professor für Theoretische Physik an der Universität Hamburg.
- 1956 *Ulrich Finsterwalder* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., München.
- 1957 *Georg Sachs* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., o. Professor für Metallurgie an der Syracuse University, Syracuse, N.Y./USA.
- 1958 *Werner Schmiedler* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E.h., em. o. Professor für Mathematik an der Technischen Universität Berlin.
- 1959 *Hans Brockmann* †, Dr. sc. nat. habil., Dr. rer. nat. h.c., em. o. Professor für Organische Chemie an der Universität Göttingen.
- 1960 *Theodor von Kármán* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E.h., Dr. rer. nat. h.c. mult., LL. D., Professor am California Institute of Technology, Pasadena, Calif./USA.
- 1961 *Kurt Paul Klöppel* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., o. Professor für Statik und Stahlbau an der Technischen Hochschule Darmstadt.
- 1962 *Walter Schottky* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E.h., Dr. rer. nat. h.c., Dr. techn. h.c., em. o. Professor für Theoretische Physik an der Universität Erlangen,
- 1963 *Gottfried Köthe* †, Dr. phil., Dr. h.c., Dr. rer. nat. h.c. mult., em. o. Professor für Angewandte Mathematik an der Universität Heidelberg.
- 1964 *Carl Wagner* †, Dr. phil., Dr. rer. nat. h.c., Dr.-Ing. E.h., Professor und vormals Direktor des Max-Planck-Instituts für Physikalische Chemie in Göttingen.
- 1965 *Albert Betz* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E.h., Dr. sc. techn. h.c., Professor und vormals Direktor der Aerodynamischen Versuchsanstalt und des Max-Planck-Instituts für Strömungsforschung in Göttingen.



- 1966 *Wilhelm Becker*, Dr. phil., Dr. h.c., em. o. Professor und Direktor der Astronomisch-Meteorologischen Anstalt der Universität Basel/Schweiz.
- 1967 *Henry Görtler* †, Dr. phil. habil., LL. D. h.c., em. o. Professor der Mathematik und vormals Direktor des Instituts für Angewandte Mathematik der Universität Freiburg i. Br.
- 1968 *Egon Orowan* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., o. Professor für Mechanical Engineering am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. [USA].
- 1969 *E. Arne Bjerhammer*, tekn. dr., Professor für Geodäsie an der Kungl. Tekniska Högskolan in Stockholm/Schweden.
- 1970 *Elie Carafoli* †, Dr. rer. nat., Professor für Aero-Gas-Dynamik an dem Polytechnischen Institut Bukarest und vormals Direktor des Institut de Mécanique des Fluides „Traian Vuia“ in Bukarest/Rumänien.
- 1971 *Walter Dieminger*, Dr. rer. techn., apl. Professor für Geophysik an der Universität Göttingen und vormals Direktor des Max-Planck-Instituts für Aeronomie in Lindau/Harz.
- 1972 *Hubert Rüsch* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., em. o. Professor für Massivbau an der Technischen Hochschule München und vormals Direktor des Amtlichen Materialprüfungsamtes für das Bauwesen.
- 1973 *Viktor Gutmann*, Dr. techn., Ph. D., Sc. D. Dr. rer. nat. h.c., Dr. Sc. h.c., em. o. Professor für Anorganische Chemie an der Technischen Universität Wien/Österreich.
- 1974 *Friedrich Tamms* †, Dr. h.c., Professor, Beigeordneter der Stadt Düsseldorf (Stadtbaurat i. R.), Freischaffender Planer.
- 1975 *Sir Michael James Lighthill*, FRS, FRAeS, Hon. D. Sc. mult., Professor für Mathematik an der University of Cambridge/Großbritannien.
- 1977 *Walter Maurice Elsasser* †, Dr. phil., o. Professor für Geophysik an der Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland/USA.
- 1977 *Helmut Moritz*, Dr. techn., Dr.-Ing. E.h., o. Professor für Geodäsie an der Technischen Universität Graz/Österreich.
- 1977 *László Fejes Tóth*, Dr., Professor und Direktor des Mathematischen Forschungsinstituts der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest/Ungarn.
- 1978 *Ulrich Grigull*, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., em. o. Professor für Thermodynamik an der Technischen Universität München.
- 1979 *Wolf Freiherr von Engelhardt*, Dr. phil., em. o. Professor für Mineralogie und Petrographie an der Universität Tübingen.
- 1980 *Hans Kuhn*, Dr. phil., Dr. rer. nat. h.c., Professor und vormals Direktor am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen.
- 1981 *Martin Kneser*, Dr. rer. nat., o. Professor für Mathematik an der Universität Göttingen.

- 1982 *Walter Burkert*, Dr. phil., o. Professor für Klassische Philologie an der Universität Zürich/Schweiz.
- 1983 *Leopold Müller* †, Dr. techn., Dr. mont. h. c., Honorarprofessor an der Universität Salzburg (Felsmechanik), Salzburg/Österreich.
- 1984 *Heinz Beneking*, Dr. rer. nat., o. Professor und Direktor des Instituts für Halbleitertechnik an der RWTH. Aachen.
- 1985 *Gerhard Ertl*, Dr. rer. nat., Dr. h. c., Professor und Direktor am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin.
- 1986 *Arno Borst*, Dr. phil., o. Professor für Geschichte des Mittelalters an der Universität Konstanz.
- 1987 *Olgierd Cecil Zienkiewicz*, FRS, Ph. D., D. Sc., Hon. D. Sc. mult., Professor of Civil Engineering an der University of Wales, Swansea/Großbritannien.
- 1988 *Heinz Brauer*, Dr.-Ing., Professor für chemische Ingenieurtechnik an der Technischen Universität Berlin.
- 1989 *Herbert Walther*, Professor für Experimentalphysik an der Universität München und Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching.
- 1990 *Raymond Klibansky*, Dr. phil. Dr. phil. h. c., Professor der Philosophie (Logik und Metaphysik) an der McGill University in Montreal, Kanada, und Fellow des Wolfson College, Oxford.
- 1991 *Wilfried B. Krätzig*, Dr.-Ing., Professor für Ingenieurmechanik an der Ruhr-Universität Bochum.
- 1992 *Ernst-Dieter Gilles*, Dr.-Ing., Professor für Meß- und Regelungstechnik an der Universität Stuttgart.
- 1993 *Hans-Heinrich Voigt*, Dr. rer. nat., o. Univ.-Prof. em. für Astronomie und Astrophysik an der Universität Göttingen.
- 1994 *Josef Fleckenstein*, Dr. phil., o. Prof. em., zuvor Direktor des Max-Planck-Instituts für Geschichte in Göttingen.
- 1995 *David G. Crighton*, FRS, Head of Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge.

## Mitgliederverzeichnis

(Stand 31. 12. 1995)

### Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Fallersleber-Tor-Wall 16, 38100 Braunschweig

Telefon: (05 31) 1 44 66 · Telefax: (05 31) 1 44 60

*Präsident:* Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Werner Leonhard  
(bis 31.12.1995)

*Generalsekretär:* Prof. Dr. rer. nat. Helmut Braß  
(bis 31.12.1997)

*Geschäftsstelle:* Frau Hannelore Haubold (Büroleiterin)  
Frau Gabriele Köppelmann (beurlaubt)  
Frau Gabriele Petersen

### Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften

*Vorsitzender:* Prof. em. Dr. phil. Horst Tietz (bis 31.12.1997)

#### *Ordentliche Mitglieder:*

Becker, Gerhard (21.12.1916), Dr. rer. nat., Dr.-Ing. h.c., Ltd. Dir. u. Prof. i.R. (Physik, PTB Braunschweig), Dießelhorststraße 32, 38116 Braunschweig

Bogen, Hans Joachim (19.11.1912), Dr. rer. nat., Prof. em. (Botanik, TU Braunschweig), Am Hohen Tore 4 A, 38118 Braunschweig

Braß, Helmut (22.2.1936), Dr. rer. nat., Prof. (Angewandte Mathematik, TU Braunschweig), Hilsstraße 26, 38122 Braunschweig

Cramer, Friedrich (20.9.1923), Dr. rer. nat., Prof. u. Dir. (Organische Chemie, MPI für Experimentelle Medizin, Göttingen), Hermann-Rein-Straße 3F, 37075 Göttingen

Dieminger, Walter (7.7.1907), Dr. rer. techn., apl. Prof. u. Dir. i.R. (Aeronomie, MPI für Aeronomie, Lindau), Berliner Straße 14, 37176 Nörten-Hardenberg

Ehrich, Hans-Dieter (2.2.1943), Dr. rer. nat., Prof. (Informatik, TU Braunschweig), Mannheimstraße 66, 38112 Braunschweig

Glaßmeier, Karl-Heinz (28.4.1954), Dr. rer. nat., Prof. (Geophysik, TU Braunschweig), Friedrich-Löffler-Weg 13, 38116 Braunschweig

Görlitzer, Klaus (29.7.1940), Dr. rer. nat., Prof. (Pharmazeutische Chemie, TU Braunschweig), Waterloostraße 15, 38106 Braunschweig

Harborth, Heiko (11.2.1938), Dr. rer. nat., Prof. (Mathematik, TU Braunschweig), Bienroder Weg 47, 38106 Braunschweig

Hartmann, Thomas (2.2.1937), Dr. rer. nat., Prof. (Pharmazeutische Biologie, TU Braunschweig), Walter-Hans-Schultze-Straße 21, 38116 Braunschweig

Haul, Robert (31.5.1912), Dr.-Ing. habil., Prof. em. (Physikalische Chemie, Universität Hannover), Schellingstraße 5, 30625 Hannover

- Heidberg, Joachim (30.1.1933), Dr. phil. nat., Prof. (Physikalische Chemie, Universität Hannover), Zuckmayerstraße 9, 30453 Hannover
- Hövermann, Jürgen (15.3.1922), Dr. rer. nat., Prof. em. (Geographie, Universität Göttingen), Nelkenweg 10, 37154 Northeim
- Hopf, Henning (13.12.1940), Dr. phil., Prof. (Organische Chemie, TU Braunschweig), Steinbrecherstraße 9, 38106 Braunschweig
- Kanold, Hans-Joachim (29.7.1914), Dr. rer. nat. habil., Prof. em. (Mathematik, TU Braunschweig), Güldenstraße 41, 38100 Braunschweig
- Kersten, Martin (28.4.1906), Dr.-Ing., Honorarprof. u. Präs. i.R. (Physik, PTB Braunschweig), Am Hohen Tore 4 A, 38118 Braunschweig
- Kertz, Walter (29.2.1924), Dr. rer. nat., Dr. h.c., Prof. em. (Geophysik und Meteorologie, TU Braunschweig), Pestalozzistraße 2, 38114 Braunschweig
- Kowalsky, Hans-Joachim (16.7.1921), Dr. rer. nat., Prof. em. (Mathematik, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 20, 38302 Wolfenbüttel
- Maaß, Günter (7.1.1934), Dr. rer. nat., Prof. (Biophysikalische Chemie, Medizinische Hochschule Hannover), Im Eichholz 27, 30657 Hannover
- Müller, Georg (1.10.1930), Dr. rer. nat. h.c., Prof. (Mineralogie und Petrographie, TU Clausthal), Einersberger Blick 27, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Müller, Hans Robert (26.10.1911), Dr. phil., Prof. em. (Mathematik, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 49, 38302 Wolfenbüttel
- Pilger, Andreas (19.12.1910), Dr. phil. habil., Prof. em. (Geologie und Paläontologie, TU Clausthal), Berliner Straße 125, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Richter, Egon (24.3.1928), Dr. rer. nat., Prof. (Theoretische Physik, TU Braunschweig), Sommerlust 33, 38118 Braunschweig
- Rieger, Georg Johann (16.8.1931), Dr. rer. nat., Prof. (Mathematik, Universität Hannover), Rosenstraße 2, 31311 Uetze
- Röhrs, Manfred (22.9.1927), Dr. rer. nat., Prof. (Zoologie, Tierärztliche Hochschule Hannover), Im Dorffeld 43, 30966 Hemmingen
- Schügerl, Karl (22.6.1927), Dr. rer. nat., Dr. h.c., Dipl.-Ing., Prof. (Technische Chemie, Universität Hannover), Arnumer Kirchstraße 31, 30966 Hemmingen
- Schumann, Hilmar (8.11.1902), Dr. phil. habil., Prof. em. (Mineralogie, TU Braunschweig), Wohnpark Hohetor, Madamenweg 14, 38118 Braunschweig
- Schwab, Klaus (20.5.1933), Dr. rer. nat., Prof. (Geologie und Paläontologie, TU Clausthal), Berliner Straße 119, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Schwink, Christoph (20.3.1928), Dr. rer. nat., Prof. em. (Physik, TU Braunschweig), Spitzwegstraße 21, 38106 Braunschweig
- Stahl, Wolfgang (17.8.1935), Dr. rer. nat., Dir. u. Prof. (Isotopengeochemie und -geophysik, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), Hermann-Löns-Weg 14, 30938 Burgwedel
- Steudel, Andreas (17.2.1925), Dr. rer. nat., Prof. (Physik, Universität Hannover), Hahnensteg 41 C, 30459 Hannover
- Tietz, Horst (11.3.1921), Dr. phil., Prof. em. (Mathematik, Universität Hannover), Röddinger Straße 31, 30823 Garbsen

- Vollmar, Roland (1.11.1939), Dr.-Ing., Prof. (Informatik, Universität Karlsruhe), Wendtstraße 10, 76185 Karlsruhe
- Wannagat, Ulrich (31.5.1923), Dr. rer. nat., Dr. techn. h.c., Prof. em. (Anorganische Chemie, TU Braunschweig), Waldweg 12, 38302 Wolfenbüttel
- Weinert, Hanns Joachim (26.1.1927), Dr. phil., Dr. rer. nat. habil., Prof. (Mathematik, TU Clausthal), Glückaufweg 6, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Welling, Herbert (1.9.1929), Dr. rer. nat., Prof. (Physik, Universität Hannover), Nogatweg 13, 30916 Isernhagen
- Willerding, Ulrich (8.7.1932), Dr. rer. nat., apl. Prof. (Botanik, Universität Göttingen), Calsowstraße 60, 37085 Göttingen
- Winterfeldt, Ekkehard (13.5.1932), Dr. rer. nat., Dr. h.c., Prof. (Organische Chemie, Universität Hannover), Sieversdamm 34, 30916 Isernhagen
- Zinner, Gerwalt (30.9.1924), Dr. phil., Prof. em. (Pharmazeutische Chemie, TU Braunschweig), Am Papenholz 14, 38104 Braunschweig

*Korrespondierende Mitglieder:*

- Bartels, Heinz, Dr. med., Prof. em. (Vegetative Physiologie, Medizinische Hochschule Hannover), Am Rehberg 7, 78337 Öhningen
- Becker, Wilhelm, Dr. phil., Dr. h.c., Prof. em. (Astronomie, Universität Basel), Im Spiegel-feld 12, CH-4102 Binningen ü. Basel/Schweiz
- Bürger, Hans, Dr. rer. nat., Dipl.-Chem., Prof. (Anorganische Chemie, Bergische Universität Wuppertal), Kruppstraße 230, 42113 Wuppertal
- Engelhardt, Wolf, Freiherr von, Dr. phil., Prof. em. (Mineralogie und Petrographie, Universität Tübingen), Wilhelmstraße 56, 72074 Tübingen
- Ertl, Gerhard, Dr. rer. nat., Prof. u. Dir. (Physikalische Chemie, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft), Garystraße 18, 14195 Berlin
- Fejes Tóth, László, Dr., Prof. (Mathematik, Hungarian Academy of Sciences), Realtanoda U. 13–15, H-1053 Budapest V/Ungarn
- Gutmann, Viktor, Dr. techn., Ph. D., Sc. D., Dr. rer. nat. h.c., Dr. Sc. h.c., Prof. em. (Anorganische Chemie, TH Wien), Trinksgeltgasse 16, A-2380 Perchtoldsdorf/Österreich
- Haken, Hermann, Dr. rer. nat., Dr. h.c. mult., Prof. (Theoretische Physik, Universität Stuttgart), Sandgrubenstraße 1, 71063 Sindelfingen
- Hengge, Edwin, Dr. techn., Prof. (Anorganische Chemie, TU Graz), Ziegelstraße 9z, A-8045 Graz/Österreich
- Keßler, Franz Rudolf, Dr. phil., Prof. em. (Physik, TU Braunschweig), Am Krausberg 12, 52351 Düren
- Kippenhahn, Rudolf, Dr. rer. nat., Prof. u. Dir. (Astrophysik, Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik), Rautenbreite 2, 37077 Göttingen
- Kneser, Martin, Dr. rer. nat., Prof. (Mathematik, Universität Göttingen), Guldenhagen 5, 37085 Göttingen
- Kuhn, Hans, Dr. phil., Prof. u. Dir. i.R. (Biophysikalische Chemie, MPI Göttingen), Ringoldswilstraße 50, CH-3656 Tschingel ob Gunten/Schweiz

- Mensching, Horst, Dr. rer. nat., Prof. em. (Geographie, Universität Hamburg), Pulverhofsweg 46, 22156 Hamburg
- Meschede, Dieter, Dr. rer. nat., Prof. (Angewandte Physik, Universität Bonn), Wegeler Straße 8, 53115 Bonn
- Schaller, Friedrich, Dr. rer. nat., Prof. (Zoologie, Universität Wien), Rebenweg 1/14/3, A-1170 Wien/Österreich
- Scriba, Christoph J., Dr. rer. nat., Prof. (Geschichte der Naturwissenschaften, Universität Hamburg), Bellevue 23, 22301 Hamburg
- Voigt, Hans Heinrich, Dr. rer. nat., Prof. em. (Astronomie und Astrophysik, Universität Göttingen), Charlottenburger Straße 19, 37070 Göttingen
- Voronkov, Michael Gregor, Dr. rer. nat., Dr. h.c., Prof. u. Dir. (Chemie, Siberian Division of the Academy of Science), 1 Favorsky Street, 664033 Irkutsk/GUS
- Witting, Hermann, Dr. rer. nat. habil., Dr. rer. nat. h.c., Prof. (Mathematik, Universität Freiburg), Anemonenweg 3, 79107 Freiburg

### **Klasse für Ingenieurwissenschaften**

*Vorsitzender:* Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. nat. h.c. Dr.-Ing. E.h. mult. Hans-Georg Unger (bis 31.12.1996)

#### *Ordentliche Mitglieder:*

- Baehr, Hans Dieter (24.6.1928), Dr.-Ing., Dr. E.h., Prof. (Thermodynamik, Universität Hannover), Max-Eyth-Straße 54, 30173 Hannover
- Batel, Wilhelm (3.11.1922), Dr.-Ing., Prof. u. Dir. (Verfahrenstechnik, FAL Braunschweig), Peter-Joseph-Krahe-Straße 8, 38102 Braunschweig
- Billib, Herbert (21.10.1904), Dr.-Ing., Dr. nat. techn. h.c., Prof. em. (Wasserwirtschaft, Hydrologie, Landwirtschaftlicher Wasserbau, Universität Hannover), Franzenbaderhof 9, 30559 Hannover
- Bohnet, Matthias (20.7.1933), Dr.-Ing., Prof. (Verfahrens- und Kerntechnik, TU Braunschweig), Otto-Hahn-Straße 45, 38116 Braunschweig
- Brethauer, Karlheinz (5.3.1922), Dr.-Ing., Prof. em. (Elektrotechnik, TU Clausthal), Berliner Straße 45, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Buchwald, Konrad (16.2.1914), Dr. phil. nat. habil., Prof. em. (Landespflanze, Universität Hannover), Große Heide 33, 30657 Hannover
- Dizioğlu, Bekir (13.12.1920), Dr.-Ing., Prof. em. (Getriebelehre und Maschinendynamik, TU Braunschweig), Marienburgweg 36, 38302 Wolfenbüttel
- Duddeck, Heinz (14.5.1928), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. (Statik, TU Braunschweig), Greifswaldstraße 38, 38124 Braunschweig
- Esslinger, Maria (4.3.1913), Dr.-Ing., apl. Prof. (Statik, DLR Braunschweig), Bussardweg 2, 38108 Braunschweig
- Funke, Paul (5.2.1930), Dr.-Ing., Prof. (Werkstoffumformung, TU Clausthal), Schulstraße 15, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Gerke, Karl (10.8.1904), Dr.-Ing., Prof. em. (Geodäsie, TU Braunschweig), Spitzwegstraße 19, 38106 Braunschweig

- Groth, Klaus (8.12.1923), Dr.-Ing., Prof. em. (Kolbenmaschinen, Universität Hannover), Schaftrift 18, 30952 Ronnenberg
- Haeßner, Frank (6.1.1927), Dr. rer. nat., Prof. (Werkstoffkunde und Herstellungsverfahren, TU Braunschweig), Julius-Leber-Straße 46, 38116 Braunschweig
- Hake, Günter (27.5.1922), Dr.-Ing., Dr. phil. h.c., Prof. em. (Topographie und Kartographie, Universität Hannover), Börje 58, 30966 Hemmingen
- Henn, Walter (20.12.1912), Dr.-Ing., Dr. techn. h.c., Prof. em. (Baukonstruktionen und Industriebau, TU Braunschweig), Ramsachleite 13, 82418 Murnau
- Herrenberger, Justus (27.5.1920), Dr.-Ing., Prof. em. (Baukonstruktion, TU Braunschweig), Ginsterweg 22, 38126 Braunschweig
- Hoeltje, Georg (16.3.1906), Dr. phil., Prof. em. (Bau- und Kunstgeschichte, Universität Hannover), Alte Herrenhäuser Straße 11c, 30419 Hannover
- Jeschar, Rudolf (17.6.1930), Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h., Prof. (Energieverfahrenstechnik, TU Clausthal), Roseneck 1, 38640 Goslar
- Kind, Dieter (5.10.1929), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Honorarprof. (Hochspannungstechnik, TU Braunschweig) u. Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Knapstraße 4, 38116 Braunschweig
- Konecny, Gottfried (17.6.1930), Dr.-Ing., Dr. h.c. mult., Prof. (Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover), Wartheweg 22, 30559 Hannover
- Kordina, Karl (7.8.1919), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Stahlbeton- und Massivbau, TU Braunschweig), Im Heidekamp 13, 38112 Braunschweig
- Kose, Volkmar (30.3.1936), Dr. rer. nat., Hoorar-Prof. (Präzisionsmeßtechnik, PTB Braunschweig), Nernstweg 9, 38116 Braunschweig
- Lautz, Günter (15.11.1923), Dr. rer. nat., Prof. em. (Elektrophysik, TU Braunschweig), Fallsteinweg 97, 38302 Wolfenbüttel
- Leilich, Hans-Otto (28.11.1925), Dr.-Ing., Prof. em. (Datenverarbeitungsanlagen, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 61a, 38302 Wolfenbüttel
- Leonhard, Werner (25.5.1926), Dr.-Ing., Dr. h.c., Prof. em. (Regelungstechnik, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 32, 38302 Wolfenbüttel
- Leschonski, Kurt (17.12.1930), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. (Mechanische Verfahrenstechnik, TU Clausthal), Am Dammgraben 20, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Lindmayer, Manfred (4.10.1941), Dr.-Ing., Prof. (Elektrische Energieanlagen, TU Braunschweig), Am Papenholz 15, 38104 Braunschweig
- Mahrenholtz, Oskar (17.5.1931), Dr.-Ing., Prof. (Mechanik, TU Hamburg-Harburg), Hermann-Löns-Weg 17F, 21220 Seevetal
- Marx, Claus (21.8.1931), Dr.-Ing., Dr. E.h., Prof. (Tiefbohrkunde und Erdölgewinnung, TU Clausthal), Am Stollen 18, 38640 Goslar
- Matthies, Hans Jürgen (6.11.1921), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Landmaschinen, TU Braunschweig), Wöhlerstraße 15, 38116 Braunschweig
- Mecke, Wilhelm (12.8.1907), Dr.-Ing., Prof. em. (Straßenwesen und Erdbau, TU Braunschweig), Pascheburging 8, 37154 Northeim
- Mitschke, Manfred (5.5.1929), Dr.-Ing., Prof. (Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig), Buchfinkweg 1, 38112 Braunschweig

- Möller, Dietrich (18.12.1927), Dr.-Ing., Prof. em. (Vermessungskunde, TU Braunschweig), Steinkamp 6, 38165 Lehre
- Mühlbauer, Alfred (9.11.1932), Dr.-Ing., Prof. (Elektrowärme, Universität Hannover), Westerfeldweg 44, 30900 Wedemark
- Musmann, Hans Georg (14.8.1935), Dr.-Ing., Prof. (Nachrichtentechnik, Universität Hannover), Heckenrosenweg 24, 38259 Salzgitter
- Natke, Hans Günther (9.5.1933), Dr. rer. nat., Dr. h.c., Prof. (Dynamik, Schall- und Meßtechnik, Universität Hannover), Pyrmonter Straße 51, 30459 Hannover
- Partenscky, Hans-Werner (3.4.1926), Dr.-Ing., Dr. phys., Dr. h.c., Prof. (Verkehrswasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover), Wiehbergstraße 20, 30519 Hannover
- Pelzer, Hans (20.1.1936), Dr.-Ing., Prof. (Vermessungskunde, Universität Hannover), Waldstraße 40, 31515 Wunstorf
- Rögner, Heinz (20.9.1913), Dr. phil., Prof. em. (Thermodynamik, Universität Hannover), Asselweg 10B, 30826 Garbsen
- Rostásy, Ferdinand Stefan (4.5.1932), Dr.-Ing., Prof. (Baustoffe und Stahlbetonbau, TU Braunschweig), Nietzschesstraße 26, 38126 Braunschweig
- Rothert, Heinrich (5.12.1938), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. (Statik, Universität Hannover), Feldbrunnenstraße 15, 20148 Hamburg
- Scheer, Joachim (5.3.1927), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Stahlbau, TU Braunschweig), Wartheweg 20, 30559 Hannover
- Schönfelder, Helmut (3.4.1926), Dr.-Ing., Prof. em. (Nachrichtentechnik, TU Braunschweig), Fürstenhofweg 1A, 38667 Bad Harzburg
- Schwerdtfeger, Klaus (16.9.1934), Dr.-Ing., Prof. (Allgemeine Metallurgie, TU Clausthal), Zeppelinstraße 28, 38640 Goslar
- Steck, Elmar (11.07.1935), Dr.-Ing., Prof. (Mechanik, TU Braunschweig), Mauernstraße 12, 38312 Borsum/Bornum
- Stein, Erwin (5.7.1931), Dr.-Ing., Dr. sc. h.c., Prof. (Baumechanik, Universität Hannover), Am Ortfelde 124, 30916 Isernhagen
- Thoma, Manfred (24.2.1929), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c., Prof. (Regelungstechnik, Universität Hannover), Westermannweg 7, 30419 Hannover
- Tönshoff, Hans Kurt (14.5.1934), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. (Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen, Universität Hannover), Bruchholzwiesen 10, 30938 Burgwedel
- Unger, Hans-Georg (14.9.1926), Dr.-Ing., Dr. rer. nat. h.c., Dr.-Ing. E.h. mult., Prof. em. (Hochfrequenztechnik, TU Braunschweig), Wöhlerstraße 10, 38116 Braunschweig
- Weh, Herbert (1.3.1928), Dr.-Ing., Dr. sc. techn. h.c., Prof. (Starkstromtechnik, TU Braunschweig), Wöhlerstraße 20, 38116 Braunschweig
- Wiendahl, Hans-Peter (11.2.1954), Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. (Arbeitsmaschinen und Fabrikanlagen, Universität Hannover), Am Winkelberge 6, 30826 Garbsen
- Wierig, Hans-Joachim (22.6.1927), Dr.-Ing., Prof. (Baustoffkunde, Universität Hannover), Hindenburgallee 31, 30989 Gehrden
- von Zabeltitz, Christian (7.8.1932), Dr.-Ing., Prof. (Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover), Hellwiesen 3, 30900 Wedemark



Zenner, Harald (8.7.1938), Dr.-Ing., Prof. (Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, TU Clausthal), Siebensternweg 22, 38678 Clausthal-Zellerfeld

Zielke, Werner (8.7.1937), Dr.-Ing., Prof. (Strömungsmechanik, Universität Hannover), Lönsweg 31, 30826 Garbsen

*Korrespondierende Mitglieder:*

Beneking, Heinz, Dr. rer. nat., Prof. (Halbleitertechnik, TH Aachen), Valkenburger Straße 17, 52074 Aachen

Bjerhammer, Arne, tekn. dr., Prof. (Geodäsie, Kungl. Tekniska Högskolan), Fack 1044, S-Stockholm 70/Schweden

Garbrecht, Günther, Dr.-Ing., Dr. sc. h.c., Prof. em. (Wasserbau, Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, TU Braunschweig), Drosselweg 15, 38179 Schwülper-Lagesbüttel

Gersten, Klaus, Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h., Prof. (Thermo- und Fluidodynamik, Universität Bochum), Hofleite 15, 44795 Bochum

Grigull, Ulrich, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Thermodynamik, TU München), Heinrich-Vogl-Straße 1, 81479 München

Hofmann, Wilhelm, Dr.-Ing., Prof. em. (Baukonstruktion und Entwerfen, Universität Hannover), Mayr-Graz-Weg 22, 82418 Murnau

Kärner, Hermann C., Dr.-Ing., Prof. (Hochspannungstechnik, TU Braunschweig), Harzblick 56, 38122 Braunschweig

Kistenmacher, Hans, Dr. rer. pol., Prof. (Regional- und Landesplanung, Universität Kaiserslautern), Friedrich-Ebert-Straße 1, 67271 Neuleiningen

Kracke, Rolf, Dr.-Ing., Prof. (Verkehrs- und Eisenbahnwesen, Universität Hannover), Buchenweg 4, 30952 Ronnenberg

Kräitzig, Wilfried B., Dr.-Ing., Prof. (Statik und Dynamik/Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum), Wagenfeldstraße 8a, 58456 Witten

Kroener, Ekkehart, Dr. rer. nat., Prof. em. (Theor. und Angew. Physik, Univ. Stuttgart), Bardiliweg 6, 70186 Stuttgart

Mayinger, Franz, Dr.-Ing., Prof. (Verfahrenstechnik, TU München), Am Haselnußstrauch 18, 80935 München

Moritz, Helmut, Dr. techn., Dr.-Ing. E.h., Prof. (Erdmessung und physikalische Geodäsie, TU Graz), Maria-Troster-Straße 114, A-8043 Graz/Österreich

Pierick, Klaus, Dr.-Ing., Prof. (Verkehr, Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung, TU Braunschweig), Am Uhlenbusch 31, 38108 Braunschweig

Ruge, Jürgen (14.5.1921), Dr.-Ing., Prof. em. (Schweißtechnik und Werkstofftechnologie, TU Braunschweig), Waldstraße 16, 82110 Germering

Schlitt, Herbert, Dr. phil. nat., Prof. (Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg), Egerlandstraße 5, 91058 Erlangen

Spengelin, Friedrich, Dipl.-Ing., Prof. (Städtebau, Universität Hannover), Habichtshorststraße 12, 30655 Hannover

Stracke, Ferdinand, Dipl.-Ing., Prof. (Städtebau und Regionalplanung, Technische Universität München), Karlstraße 43/II, 80333 München

- Torge, Wolfgang, Dr.-Ing., Prof. (Theoretische Geodäsie, Universität Hannover), Mönchekamp 4 A, 30457 Hannover
- Triebel, Wolfgang, Dr.-Ing., Honorarprof. (Bauforschung, Universität Hannover), Max-Eyth-Straße 48, 30173 Hannover
- Truckenbrodt, Erich, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h., Prof. em. (Strömungsmechanik, TU München), Josef-Würth-Straße 12, 82031 Grünwald
- Weimann, Günter, Dr.-Ing., Prof. em. (Photogrammetrie und Kartographie, TU Braunschweig), Knupfental 40, 89520 Heidenheim
- Zerna, Wolfgang, Dr.-Ing., Prof. em. (Konstruktiver Ingenieurbau, Universität Bochum), Am Wittenstein, 45527 Hattingen
- Zumpe, Günter, Dr.-Ing. habil., Prof. (Mechanik, TU Dresden), Goetheallee 32 A, 01309 Dresden

### **Klasse für Geisteswissenschaften**

*Vorsitzender:* Prof. Dr. med. Dr. phil. habil. Claus-Artur Scheier (bis 31.12.1995)

#### *Ordentliche Mitglieder:*

- Boeder, Heribert (17.11.1928), Dr. phil., Prof. (Philosophie, Universität Osnabrück), Lönsweg 10, 49076 Osnabrück
- Henne, Helmut (5.4.1936), Dr. phil., Prof. (Germanistische Linguistik, TU Braunschweig), Platanenstraße 27, 38302 Wolfenbüttel
- Kamp, Norbert (24.8.1927), Dr. phil., Prof. (Mittelalterliche Geschichte, Universität Göttingen), Leipziger Straße 236 B, 38124 Braunschweig
- Kühne, Gunther (25.8.1939), LL.M., Dr. iur., Prof. (Berg- und Energierecht, TU Clausthal), Arnold-Sommerfeldt-Straße 6, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Lohse, Eduard (19.2.1924), Dr. theol. D., Honorarprof. u. Landesbischof i.R. (Ev.-luth. Landeskirche Hannover), Ernst-Curtius-Weg 7, 37075 Göttingen
- Maurach, Gregor (3.3.1932), Dr. phil., Prof. (Lateinische Philologie, Universität Osnabrück), Anton-Aulke-Straße 27, 48167 Münster
- Meckseper, Cord (29.10.1934), Dr.-Ing. habil., Prof. (Bau- u. Kunstgeschichte, Universität Hannover), Eisenacher Weg, 30179 Hannover
- Mohr, Hans-Heinrich (1.6.1917), Dr. rer. pol. (Versicherungswissenschaften), Am Bürgerpark 4a, 38102 Braunschweig
- Müller, Gerhard (10.5.1929), Dr. theol., D.D., Honorarprof. u. Landesbischof i.R. (Ev.-luth. Landeskirche Braunschweig), Sperlingstraße 59, 91056 Erlangen
- Nitz, Hans-Jürgen (20.8.1929), Dr. phil., Prof. (Kulturgeographie, Universität Göttingen), Kramberg 21, 37120 Bovenden
- Oberbeck, Gerhard (5.10.1925), Dr. rer. nat., Prof. em. (Geographie und Wirtschaftsgeographie, Universität Hamburg), Ginsterweg 4, 25474 Ellerbek
- Raabe, Paul (21.2.1927), Dr. phil. habil., Dr. h.c. mult., apl. Prof. (Deutsche Literaturwissenschaft, Universität Göttingen, ehem. Direktor der Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel), Roseggerweg 45, 38304 Wolfenbüttel

- Rengeling, Hans-Werner (25.2.1938), Dr. iur., Prof. (Umweltrecht, Universität Osnabrück), Langeworth 143, 48159 Münster
- Rötting, Hartmut, M.A., Honorarprof. (Denkmalpflege, Stadtarchäologie, TU Braunschweig), Lobmachersche Straße 18, 38312 Cramme
- Scheier, Claus-Artur (8.9.1942), Dr. phil. habil., Dr. med., Prof. (Philosophie, TU Braunschweig), Brahmsstraße 1, 38106 Braunschweig
- Schillemeit, Jost (18.2.1931), Dr. phil., Prof. (Deutsche Literaturwissenschaft, TU Braunschweig), Friedensallee 48, 38104 Braunschweig
- Schindel, Ulrich (10.10.1935), Dr. phil. habil., Prof. (Klassische Philologie, Universität Göttingen), Albert-Schweitzer-Straße 3, 37075 Göttingen
- Thieme, Werner (13.10.1923), Dr. jur., Prof. (Verwaltungslehre, Universität Hamburg), Am Karpfenteich 58, 22339 Hamburg
- Thies, Harmen (26.12.1941), Dipl.-Ing., Dr. phil., Prof. (Baugeschichte, TU Braunschweig), Rodeweg 3, 38162 Abbenrode
- Warncke, Carsten-Peter (21.6.1947), Dr. phil., Prof. (Kunstgeschichte, TU Braunschweig), Neue Straße 30, 38300 Wolfenbüttel
- Wilhelm, Herbert (8.6.1922), Dipl.-Kaufm., Dr. oec., Prof. em. (Volkswirtschaftslehre, TU Braunschweig), Hirschbergstraße 16, 38124 Braunschweig

*Korrespondierende Mitglieder:*

- Borst, Arno, Dr. phil., Prof. (Mittelalterliche Geschichte, Universität Konstanz), Längerbühlstraße 42, 78467 Konstanz
- Burkert, Walter, Dr. phil., Prof. (Klassische Philologie, Universität Zürich), Wildsbergstraße 8, CH-8610 Uster/Zürich (Schweiz)
- Ehlers, Joachim, Dr. phil., Prof. (Geschichtswissenschaften, FU Berlin), Am Wieselbau 9, 14169 Berlin
- Elbern, Victor H., Dr. phil., Honorarprof., (Kunstgeschichte, FU Berlin), Ilsteinweg 42, 14129 Berlin
- Fehl, Philipp P., Ph. D., Dr. phil., Prof. em. (Kunstgeschichte), School of Art and Design, 408 East Peabody Drive, University of Illinois, USA-Champaign, Illinois 61820
- Garrigues, Marie-Odile, Dr. phil., Prof. (Philosophie und Theologie), Via San Damaso 49, I-00165 Rom/Italien
- Klibansky, Raymond, Dr. phil., Prof. (Philosophie, Wolfson College, Oxford University), GB-Oxford OX2 6UD/Großbritannien
- Lavrov, Sergej, Dr., Prof. (Ökonomische Geographie, Universität St. Petersburg), St. Petersburg/GUS
- Neumann, Günter, Dr. phil., Prof. em. (Sprachwissenschaften, Univ. Würzburg), Thüringer Straße 20, 97078 Würzburg
- Narkiss, Bezalel, Dr. phil., Prof. (Department of Art History u. Direktor des Index of Jewish Art, Hebrew University Jerusalem), The Hebrew University, Jerusalem/Israel
- Oexle, Otto Gerhard, Dr. phil., Prof. (Geschichte, Direktor des MPI für Geschichte, Göttingen), Planckstraße 15, 37073 Göttingen

- Peroni, Adriano, Dr. phil., Prof. (Kunstgeschichte, Universität Florenz), Via Lungo L'Affrico 164, I-50137 Florenz/Italien
- Poeschke, Joachim, Dr. phil., Prof. (Kunstgeschichte, Universität Münster), Mühlenstraße 18, 48308 Senden
- Rambaldi, Enrico, Dr. phil., Prof. (Philosophie, Universität Mailand), Via Monte Bianco 36, I-20149 Milano/Italien
- Raupach, Hans, Dr. jur. habil., Prof. em. (Soziologie, Universität München), Maisinger Weg 24, 82319 Söcking
- Rosen, Stanley, Dr. phil., Prof. (Philosophie, Pennsylvania State University), 1256 South Garner Street, State College, Pennsylvania 16801/USA
- Schneidmüller, Bernd, Dr. phil. habil., Prof. (Mittelalterliche Geschichte, Universität Bamberg), Reuthersberg 18, 96135 Stegaurach
- Ströker, Elisabeth, Dr. phil., Dr. phil. h.c., Prof. (Philosophie, Universität Köln), Wüllnerstraße 135, 50935 Köln
- Szlezák, Thomas A., Dr. phil., Prof. (Griechische Philologie, Universität Tübingen), Neckarhalde 3, 72070 Tübingen
- Tsujimura, Koichi, Dr. phil., Prof. (Philosophie, Universität Kyoto), Sakyoku, Kamitakano, Higashida-cho 12, J-606 Kyoto/Japan
- Ullmann, Ernst, Dr. phil. habil., Prof. (Kunstgeschichte, Universität Leipzig), Tschaikowskistraße 31, 04105 Leipzig
- Voppel, Götz, Dr. rer. pol., Prof. (Wirtschafts- und Sozialgeographie, Universität Köln), Neckarstraße 58, 51149 Köln
- Zeitler, Rudolf, Dr. phil., Prof. em. (Kunstgeschichte, Universität Uppsala), Regngatan 16, S-75431 Uppsala/Schweden







